



DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA DEI SISTEMI MECCANICI
(XX CICLO)

ANALISI DELLA ECOCOMPATIBILITA' E DELLA ECOSOSTENIBILITA' DEGLI SCENARI ENERGETICI ATTUALI E FUTURI

Tutor:

Ch.mo Prof. Ing. Ciro Noviello

Coordinatore:

Ch.mo Prof. Ing. Raffaele Tuccillo

Candidato:

Claudio Laterza

•

*Esprimo un vivissimo ringraziamento al prof. Noviello,
dal quale, in questi anni, ho ricevuto moltissimo
al quale, comunque, spero di avere dato qualcosa*

In memoria di mio fratello Valerio

INDICE

1. IL PROBLEMA ENERGETICO..... 11

1.1	DEFINIZIONE DEL PROBLEMA	11
1.2	IL PROBLEMA TECNICO.....	13
1.3	IL PROBLEMA ECONOMICO.....	21
1.4	IL PROBLEMA AMBIENTALE	29
1.4.1	<i>L'impatto ambientale della produzione energetica</i>	<i>30</i>
1.4.2	<i>Eco-compatibilità dei processi combustivi</i>	<i>31</i>
1.4.3	<i>Eco-sostenibilità dei processi combustivi.....</i>	<i>35</i>
1.5	IL PUNTO DI VISTA FILOSOFICO	41

2. LE FONTI FOSSILI..... 48

2.1	DALLA FORZA DEI MUSCOLI ALLA PREPOTENZA DELLE FONTI FOSSILI	48
2.2	IL CARBONE.....	54
2.2.1	<i>Impatto ambientale ed impieghi.....</i>	<i>56</i>
2.2.2	<i>Produzione, consumo e riserve</i>	<i>59</i>
2.3	IL PETROLIO.....	61
2.3.1	<i>Impatto ambientale ed impieghi.....</i>	<i>63</i>
2.3.2	<i>Produzione, consumi e riserve.....</i>	<i>64</i>
2.4	IL GAS NATURALE	65
2.4.1	<i>Impatto ambientale ed impieghi.....</i>	<i>66</i>
2.4.2	<i>Produzione, consumi e riserve.....</i>	<i>67</i>

3. L'ENERGIA NUCLEARE..... 70

3.1	GLI ALBORI DELL'ENERGIA NUCLEARE.....	70
3.2	LE CENTRALI NUCLEARI A FISSIONE	72
3.2.1	<i>L'impatto ambientale dei reattori nucleari a fissione</i>	<i>76</i>
3.2.2	<i>La necessità di depositi geologici</i>	<i>80</i>
3.2.3	<i>L'opportunità di ridurre le scorie transuraniche</i>	<i>82</i>
3.2.4	<i>Il combustibile ad ossidi misti (MOX)</i>	<i>86</i>
3.2.5	<i>Stima ed allocazione delle riserve di materiale nucleare</i>	<i>86</i>
3.2.6	<i>Il futuro dei reattori fissione nucleari.....</i>	<i>88</i>
3.3	I REATTORI A FUSIONE NUCLEARE	93
3.3.1	<i>Verso l'obiettivo.....</i>	<i>94</i>
3.3.2	<i>Le criticità.....</i>	<i>95</i>
3.3.3	<i>I pregi.....</i>	<i>96</i>

4. LE FONTI RINNOVABILI..... 98

4.1	PREGI E LIMITI DELLE FONTI RINNOVABILI.....	98
4.2	I RAPPORTI DI FORZA TRA LE ENERGIE RINNOVABILI	101

5 L'ENERGIA IDROELETTRICA, EOLICA E GEOTERMICA 104

5.1	L'ENERGIA IDROELETTRICA.....	104
5.1.1	Le tipologie di impianti.....	105
5.1.2	Alcuni dati.....	106
5.2	L'ENERGIA EOLICA.....	108
5.2.1	Le tipologie di impianti.....	109
5.2.3	Alcuni dati.....	112
5.3	L'ENERGIA GEOTERMICA	113
5.3.1	Le tipologie di impianti.....	114
5.3.2	Alcuni dati.....	116

6. L'ENERGIA SOLARE..... 118

6.1	LE POTENZIALITÀ DELL'ENERGIA SOLARE	118
6.2	IL SOLARE TERMICO	123
6.2.1	I collettori solari piani.....	126
6.2.2	I collettori solari a concentrazione.....	127
6.2.3	Gli obblighi per gli edifici di nuova costruzione o ristrutturati integralmente	127
6.2.4	Le agevolazioni fiscali relative agli edifici esistenti.....	129
6.3	IL FOTOVOLTAICO	131
6.3.1	Gli impianti fotovoltaici ad isola	133
6.3.2	Gli impianti fotovoltaici connessi alla rete.....	134
6.3.3	Gli incentivi in “conto energia”	135
6.3.4	Le opportunità del “conto energia”	138

7. LE BIOMASSE..... 150

7.1	I PROCESSI DI CONVERSIONE BIOCHIMICA	151
7.1.1	Digestione aerobica	151
7.1.2	Digestione anaerobica	152
7.2	I PROCESSI DI CONVERSIONE TERMICHIMICA	152
7.2.1	Cofiring.....	153
7.2.2	Pirolisi.....	153

7.2.3	<i>Gassificazione</i>	154
7.3	I BIOCOMBUSTIBILI	155
7.3.1	<i>Bioetanolo</i>	155
7.3.2	<i>Biodiesel</i>	156
7.3.3	<i>Metanolo</i>	160
7.4	IL POTENZIALE ENERGETICO DELLE BIOMASSE	161
7.5	I LIMITI DELL'IMPIEGO ENERGETICO	162
7.6	SE LA BIOMASSA E' UN RIFIUTO	166
7.7	IL RUOLO DELLE BIOMASSE NEGLI SCENARI ENERGETICI	167

8. L'IDROGENO 169

8.1	LE PROPRIETA' CHIMICO-FISICHE	169
8.2	GLI IMPIEGHI	171
8.3	LA COMBUSTIONE DIRETTA	172
8.4	L'OSSIDAZIONE NELLE CELLE A COMBUSTIBILE	172
8.5	L'IMPATTO AMBIENTALE	176
8.6	LA PRODUZIONE DI IDROGENO	177
8.6.1	<i>Lo steam reforming del metano</i>	178
8.6.2	<i>L'elettrolisi dell'acqua</i>	180
8.6.3	<i>La produzione per via termica</i>	182
8.7	L'ACCUMULO DELL'IDROGENO	184
8.7.1	<i>L'accumulo in forma gassosa</i>	186
8.7.2	<i>L'accumulo in forma gassosa</i>	186
8.7.3	<i>L'accumulo mediante idruri metallici</i>	187
8.8	L'INTEGRAZIONE DELL'IDROGENO NEI SISTEMI ENERGETICI	188
8.8.1	<i>L'idrogeno al servizio delle utenze isolate</i>	188
8.8.2	<i>Le finalità di recupero energetico</i>	189
8.8.3	<i>I vantaggi ambientali dell'idrogeno</i>	190

9. CONCLUSIONI 194

9.1	LA POLITICA ENERGETICA DI BREVE PERIODO	194
9.1.1	<i>La riduzione degli sprechi</i>	195
9.1.2	<i>La razionalizzazione dei sistemi energetici</i>	196
9.1.3	<i>L'incentivazione delle fonti rinnovabili</i>	196
9.2	LA POLITICA ENERGETICA NEL MEDIO-LUNGO PERIODO	197

BIBLIOGRAFIA 200

PREMESSA

Dopo essere stato ammesso al XX ciclo del corso di Dottorato di Ricerca in Ingegneria dei Sistemi Meccanici presso l'Università Federico II di Napoli, mi son dovuto porre il problema di elaborare il percorso di formazione che mi avrebbe portato a discutere la mia tesi dottorale.

Era un periodo molto particolare della mia vita. Da poco avevo appreso che mia moglie Maria era incinta; portava in grembo i due ovuli fecondati che il 22 luglio 2005 sarebbero diventati i nostri primi due figli, Chiara ed Alessandro.

Avrei potuto scegliere di sviluppare ulteriormente l'esperienza sperimentale descritta nella mia tesi di laurea, ma di fronte al dono delle vite in arrivo mi sono sentito inchiodato davanti alle mie responsabilità di futuro genitore. Con spirito – penso - tipicamente paterno, ho provato ad immaginare il futuro dei miei nascituri figli nel tentativo di rispondere alla seguente domanda: *“Il mondo che troveranno “da grandi” sarà migliore, peggiore od uguale rispetto a quello attuale?”*.

E così ho pensato alle ingiustizie, alle disuguaglianze sociali, alle malattie: no, decisamente, il mondo di oggi non è perfetto!

Quindi, ho pensato a mia madre ed a tutte le difficoltà che le persone non più giovani incontrano oggi: il mondo odierno è per loro probabilmente troppo veloce e complesso.

Rispetto ai nostri genitori, noi giovani corriamo sempre, siamo spesso in ritardo, vaghiamo apparentemente senza meta alla ricerca di obiettivi inseguiti più per emulazione che per condivisione. Però, godiamo di una aspettativa di vita ben più elevata, temiamo di meno le malattie, siamo più indipendenti. Nei paesi occidentali, poi, nessuno si sognerebbe di mettere in discussione la pari dignità tra uomo e donna, né tanto meno teorizzerebbe l'esistenza di una razza ariana a danno di altre inferiori, né potrebbe accettare l'analfabetismo. Eppure, si tratta di conquiste piuttosto recenti, se è vero che appena sessanta anni or sono si trattava di traguardi tutt'altro che scontati.

Pensandoci bene, ideologicamente parlando, il mondo è molto migliorato dalle origini ad ora.

Questa conclusione all'epoca, mi rinfrancò. Subito, però, la mia mente fu presa altri dubbi: *“Se io e Maria - mia moglie - riusciremo ad essere un buon esempio, i nostri figli potrebbero vivere in un mondo ancora migliore. Ma ... sarà proprio così? Qui si sente parlare di carne agli estrogeni, di pesce al mercurio, di frutta e verdura piena di anticrittogamici, di nuove malattie, di problemi con gli immigrati, di corruzione, di precarietà del lavoro, di smog in continuo aumento, di buco dell'ozono, di scioglimento dei ghiacci, di riscaldamento globale. Sarà vero o sono tutte fesserie”?*

Non sono biologo, né nutrizionista; di medicina capisco poco; non sono un funzionario dell'Ufficio Immigrazione, né tanto meno un rappresentante delle Forze Armate o un esperto di diritto del lavoro. Sono, però, un ingegnere meccanico da sempre appassionato di Energetica, Finanza ed Economia.

Così, all'epoca, ritenni di poter provare a dire la mia in termini di inquinamento, buco dell'ozono, riscaldamento globale e gestione dei sistemi energetici. Iniziosi da lì il percorso di studio e ricerca che mi ha portato a scrivere questa tesi.

Decisi di partire da un'affermazione che negli ultimi tempi è diventata sempre più ricorrente: *“Il mondo si sta avviando verso una crisi energetica!”*. Ma al di là di un certo gusto quasi “terroristico” volevo capire cosa ci fosse di vero in un monito così inquietante.

Dunque, ne parlai con il prof. Noviello, dal quale raccolsi piena disponibilità a guidarmi in questo cammino. E così, insieme, passo dopo passo, discussione dopo discussione, abbiamo definito un percorso formativo di approfondimento delle tematiche relativamente ad alcuni aspetti connessi all'eco-compatibilità ed all'eco-sostenibilità degli scenari energetici italiani, europei e mondiali.

All'inizio, la vastità dell'argomento mi ha spaventato, ma al tempo stesso mi ha eccitato. In questa tesi, infatti, ho riversato un entusiasmo enorme ed, oggi, capisco che la convinzione di fare

qualcosa di utile per i miei figli e le future generazioni in generale ha rappresentato per me uno sprone probabilmente ineguagliabile.

Le prime domande con cui mi sono confrontate sono: *“Cosa è un problema energetico? Esiste un problema energetico?”*. Il primo capitolo nasce dalla volontà di trovare adeguate risposte.

Dopo aver appurato l'esistenza di un problema energetico, ho inteso confrontarmi con le armi energetiche a disposizione dell'umanità. Lo studio è stato ad ampio spettro anche perché ho potuto seguire un'impostazione di tipo orizzontale profittando del fatto che, non beneficiando di alcuna borsa di studio, non dovevo sottostare a vincoli particolari nella scelta degli argomenti da affrontare. Piuttosto che dedicarmi allo studio di argomenti specialistici o settoriali, ho preferito eseguire un passaggio a volo di uccello sull'attuale panorama energetico.

Tale scelta rispondeva alla mia volontà di verificare se alcune mie sensazioni circa tendenze ed orientamenti energetici fossero rispondenti al vero o semplicemente si trattasse di percezioni del tutto soggettive. Da tempo, infatti, alcune domande mi arrovellavano la mente: *“Perché i veicoli a gasolio sono stati per tanti anni fiscalmente penalizzati rispetto alle meno efficienti automobili a benzina? Di contro, perché le imbarcazioni a vela non sono fiscalmente privilegiate rispetto a yacht e superyacht? E' vero che l'idrogeno è la panacea di ogni male? Ed allora perché non decolla la tanto auspicata economia all'idrogeno? Perché gli impianti centralizzati di generazione del calore stanno scomparendo sostituiti da caldaie domestiche a minore efficienza? Perché per il condizionamento invernale non si utilizzano pompe di calore, bensì impianti termici a minor efficienza?”*. Le domande sorgevano spontanee dalla considerazione che la ricerca di una vera ottimizzazione dei sistemi energetici, almeno così come avevo appreso durante gli insegnamenti universitari degli ultimi anni di corso di laurea, avrebbe dovuto portare in tutt'altra direzione.

Così in mezzo alla difficoltà di dover nuotare in un mare di dati, opinioni, tesi, pubblicazioni, articoli e lavori in generale presenti in letteratura, sono riuscito a sviluppare tante mie opinioni personali di cui questo elaborato è un sunto.

Durante tutto il lavoro mi sono sempre sforzato di non scadere mai nel personale e nel soggettivo, ho cercato di presentare risultati e dati oggettivi nella speranza che ogni lettore possa trovare nella mia tesi una fonte di informazione indipendente su cui iniziare a formare le proprie opinioni. Perché, a mio avviso, non esiste una sola soluzione al problema energetico; ma esistono anche tante false soluzioni che potenzialmente potrebbero mettere a rischio il futuro delle prossime generazioni. E per scongiurare tale rischio, tutti noi, ognuno con le proprie competenze, ha il diritto/dovere di prendere parte ad una discussione che potrebbe riguardare la sopravvivenza della vita così come siamo abituati ad intenderla.

1. IL PROBLEMA ENERGETICO

Si sente spesso parlare di “imminente” crisi energetica. Ma di cosa si tratta? E’ grave per il futuro dell’umanità? E, nel caso, quanto tempo abbiamo per cercare soluzioni e rimedi? Insomma hanno ragione coloro che paventano una catastrofe o, piuttosto, quelli che sono sempre pronti a minimizzare il problema? Nella stesura della mia tesi di Dottorato ho scelto di partire esattamente dalle domande che mi angustiarono. Nel prosieguo proverò a dare risposte non certo esaustive, spesso neanche univoche, ma il più possibile basate su dati certi ed esplicitando chiaramente le ipotesi fatte; il tutto nel tentativo di portare un contributo il più possibile oggettivo al fine di consentire a chiunque di costruirsi opinioni proprie, anche in disaccordo con il sottoscritto.

1.1 DEFINIZIONE DEL PROBLEMA

Una crisi energetica consiste in un ipotetico scenario internazionale in cui ad ampie fasce di popolazione sarebbe preclusa la possibilità di vedere soddisfatta la propria sete di energia con conseguenti enormi difficoltà nello svolgimento di attività primarie essenziali. Provate ad immaginare un mondo senza ascensori, senza trasporto privato, con un sistema di trasporto pubblico fortemente ridimensionato, senza illuminazione stradale, con frequenti funzionamenti a singhiozzo di elettrodomestici, cellulari, computer, sistemi di condizionamento estivo ed invernale. Nell’ipotesi di uno scenario internazionale con offerta di energia insufficiente a soddisfare la domanda, sarebbe necessario privilegiare i soli servizi essenziali alla vita: per esempio, sarebbe opportuno garantire il pieno funzionamento di ospedali, aziende sanitarie ed industrie farmaceutiche, la produzione ed il trasporto degli alimenti, il pompaggio delle acque.

Un eventuale problema energetico rappresenterebbe per il mondo intero una sfida tecnica, economica, ambientale e filosofica: nell'ambito di un problema tecnico, occorrerebbe attivarsi per razionalizzare gli usi energetici e potenziare i sistemi di produzione e distribuzione delle fonti disponibili; nell'ambito di un problema economico, un eccessivo costo dell'energia sarebbe ragione di esclusione di ampie fasce di popolazione ed occorrerebbe attivarsi per calmierare i prezzi al fine di garantire a tutti i consumi energetici relativi ai servizi essenziali; nell'ambito di un problema ambientale, considerazioni di carattere ecologico imporrebbero di dover limitare lo sfruttamento di fonti, rete ed impianti di produzione; infine, barriere di origine filosofica potrebbero nascere allorquando si rivelasse conveniente o necessario adottare opportune limitazioni di carattere politico, per esempio, per discriminare usi energetici voluttuari ed essenziali.

Un problema energetico è sempre cosa complessa perché può sottendere punti di vista in contrasto reciproco e, per la risoluzione, presuppone un'opera di intermediazione equilibrata, nonché una corretta visione di lungo periodo. L'ultimo aspetto, forse ancor di più del primo, è particolarmente delicato: le crisi energetiche, per loro natura, iniziano a manifestarsi parecchio tempo prima di raggiungere l'apice ed, una volta esplose in fase cruenta, i rimedi attuabili necessitano di tempo perché possano dare risultato. Basti pensare ai lunghi tempi necessari per costruire una centrale elettrica di produzione (dalla progettazione al collaudo possono trascorrere diversi anni) o per costruire una capillare rete di distribuzione energetica (la metanizzazione di un territorio ampio può richiedere anche qualche decennio). I problemi energetici, dunque, devono essere affrontati in via preventiva.

1.2 IL PROBLEMA TECNICO

Il punto di partenza per una corretta valutazione del problema energetico da un punto di vista tecnico è sicuramente l'analisi dei dati relativi a consumi, produzione e riserve di energia primaria.

	Asia or. e Oceania	Europa	Nord America	Asia centrale	Centro e Sud America	Africa	Mondo
1981	1.169	2.811	2.071	145	247	158	6.602
1982	1.180	2.816	2.002	157	254	173	6.582
1983	1.228	2.843	1.991	171	258	179	6.671
1984	1.323	2.932	2.092	191	269	185	6.993
1985	1.389	3.024	2.093	204	275	192	7.176
1986	1.457	3.087	2.102	217	293	197	7.354
1987	1.531	3.165	2.172	226	304	202	7.599
1988	1.637	3.208	2.262	235	317	215	7.874
1989	1.728	3.204	2.312	248	322	216	8.031
1990	1.800	3.206	2.316	260	327	223	8.132
1991	1.886	3.144	2.320	268	335	223	8.175
1992	1.963	3.036	2.359	284	345	224	8.211
1993	2.067	2.921	2.408	298	358	227	8.281
1994	2.179	2.795	2.460	322	375	236	8.367
1995	2.319	2.780	2.507	339	392	246	8.583
1996	2.433	2.808	2.592	355	414	256	8.858
1997	2.486	2.764	2.615	371	432	261	8.930
1998	2.435	2.780	2.633	382	446	267	8.942
1999	2.505	2.780	2.676	391	446	272	9.071
2000	2.607	2.829	2.737	403	456	276	9.309
2001	2.674	2.856	2.682	420	457	279	9.369
2002	2.775	2.858	2.723	445	461	286	9.549
2003	2.984	2.905	2.742	464	463	299	9.856
2004	3.269	2.956	2.799	501	485	313	10.323
2005	3.470	2.982	2.816	533	508	316	10.624
2006	3.642	3.027	2.803	554	529	324	10.878

Tabella 1.1 - Consumi mondiali per area continentale (in Mtep)
(fonte British Petroleum)

Nella tabella 1.1 sono riportati i consumi mondiali di energia primaria negli ultimi 25 anni suddivisi per area geografica continentale. I dati riportati sono relativi a consumi da fonte fossile, nucleare ed idroelettrica (in quest'ultimo caso è stata calcolata l'energia primaria equivalente ipotizzando un rendimento di conversione del 38%). La tabella è stata ricostruita prendendo in

considerazione solo i combustibili commerciali, mentre sono state trascurate altre fonti (biomasse, solare, geotermico, eolico) i cui contributi a livello mondiale sono comunque modesti e, a dire della fonte, non sempre di facile individuazione. In questa ipotesi, nel 2006 il fabbisogno di energia primaria è stato soddisfatto con il mix di fonti energetiche riportato nella figura 1.1.

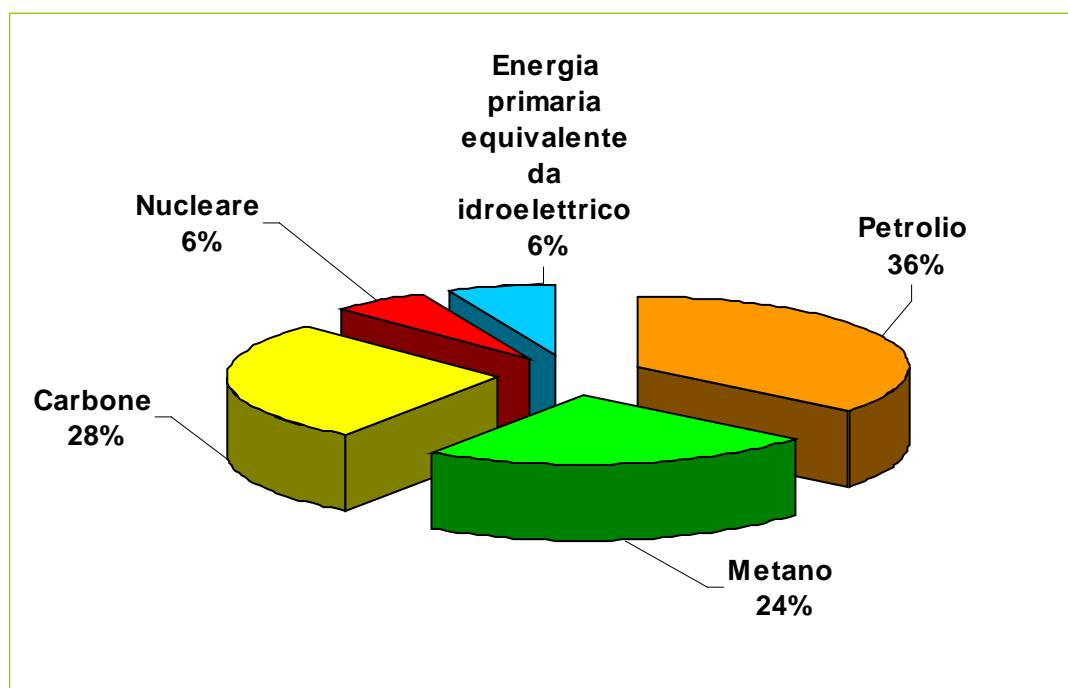


Figura 1.1 - Mix di fonti energetiche nel 2006

Negli ultimi 5 e 25 anni i consumi mondiali di energia primaria sono cresciuti rispettivamente del 16,1% (+3,0% composto all'anno) e del 64,8% (+2,0% composto all'anno).

	Asia or. e Oceania	Europa	Nord America	Asia centrale	Centro e Sud America	Africa
'01/'06	36,20%	6,00%	4,50%	31,90%	15,60%	16,00%
'81/'06	211,60%	7,70%	35,30%	281,20%	113,70%	104,60%

Tabella 1.2 - Variazione dei consumi di energia primaria nei periodi '01/'06 e '81/'06

Analizzando i dati, però, è subito evidente una forte disomogeneità continentale. Visionando i numeri di tabella 1.2, infatti, emerge immediatamente che nel quinquennio 2001-2006 i consumi

in Europa e Nord America sono cresciuti meno della media mondiale, in Africa e nel resto delle Americhe sono cresciuti in linea con la media, in Asia sono cresciuti ben al di sopra della media.

Ugualmente nel periodo 1981-2006, i consumi di energia primaria sono cresciuti al di sotto della media in Europa e Nord America, ben al di sopra nel resto del mondo (con punte massime nelle regioni asiatiche): più in particolare, su base quinquennale le variazioni più importanti in termini percentuali in Asia centrale si sono manifestate nel periodo '81-'86 con una media annua dell'8,3% ed in Asia orientale nel quinquennio '01-'06 con una media annua del 4,5%.

Attualmente le riserve di petrolio, gas naturale e metano sono stimate rispettivamente in 166, 163 e 463 Gtep; ritenendo improbabile che nei prossimi anni possano essere individuati nuovi giacimenti di capacità tali da determinare consistenti variazioni delle stime, si può concludere che le riserve fossili ammontino a circa 791 Gtep. Ipotizzando una disponibilità infinita per il combustibile nucleare (vedremo in seguito sotto quali ipotesi e con quali limiti tale assunzione è possibile), stante il carattere di rinnovabilità della fonte idroelettrica, è evidente che l'attuale livello di consumi energetici è subordinato alla disponibilità di fonti fossili. I consumi di energia primaria da petrolio, gas naturale e carbone, attualmente sono configurabili rispettivamente in 3.890, 2.575 3.090 Mtep; in totale gli attuali consumi di energia primaria da fonte fossile sono pari 9.555 Mtep.

	Petrolio	Gas naturale	Carbone	Totale
Riserve [Gtep]	166	163	463	791
Consumi [Mtep]	3.890	2.575	3.090	9.555

Tabella 1.3 - Schema riassuntivo di consumi e riserve fossili nel 2006

Con gli attuali ritmi di consumo, l'autonomia dei sistemi energetici attualmente alimentati a petrolio è pari a 43 anni, per quelli a gas naturale si innalza a 63, per quelli a carbone sale a 150. Rapportando la totalità delle riserve con l'attuale consumo annuale da fonte fossile, si ricava

un'autonomia complessiva di circa 83 anni, naturalmente ipotizzando la conversione verso le residue fonti disponibili man mano che vengono meno le meno abbondanti.

Ad un lettore attento, non sarà sfuggito che il calcolo dell'autonomia è stato eseguito rapportando le riserve ai consumi in luogo della più usuale pratica di rapportare le riserve alla produzione. In realtà, ai nostri fini le due cose coincidono: in generale le scorte di breve periodo di enti, istituzioni e nazioni sono fluttuanti intorno ad un valore medio che dipende dal grado di autonomia energetica che ciascuno vuole mantenere anche in caso di interruzione delle forniture energetiche. Sono proprio queste scorte che nell'inverno del 2007 hanno consentito di mandare avanti, senza colpo ferire, le attività industriali e civili nel momento in cui si è verificata una riduzione del flusso di gas naturale proveniente da Russia ed Ucraina. Naturalmente, salvo consistenti variazioni delle scorte di lungo periodo, avendo l'accortezza di considerare periodi di osservazione sufficientemente lunghi, le piccole fluttuazioni stagionali diventano irrilevanti rispetto al totale per cui è possibile ipotizzare che tutta la produzione annuale sia inviata al consumo, come peraltro confermato dal diagramma di figura 1.2 che riporta la produzione ed i consumi annuali nel mondo a partire dal 1981. Quando non ci sono sostanziali differenze tra consumi e produzione annuale, è sempre possibile rapportare le riserve ai consumi con il vantaggio di conservare l'informazione circa la distribuzione geografica dei fabbisogni energetici. E' evidente che in caso di un conflitto mondiale tale ipotesi sarebbe inapplicabile perché sicuramente i governi nazionali tenderebbero ad inviare ai depositi militari ingenti e crescenti quantità di combustibile. In questo (malaugurato!) caso, sicuramente si creerebbe una forbice tra produzione e consumo annuale globale; l'entità di questo ipotetico divario è tanto più ampia quanto maggiore è il livello di sicurezza che si vuole garantire ovvero è proporzionale alla maggiore o minore capacità di mantenere le posizioni ed attaccare esclusivamente attingendo energia dai depositi.

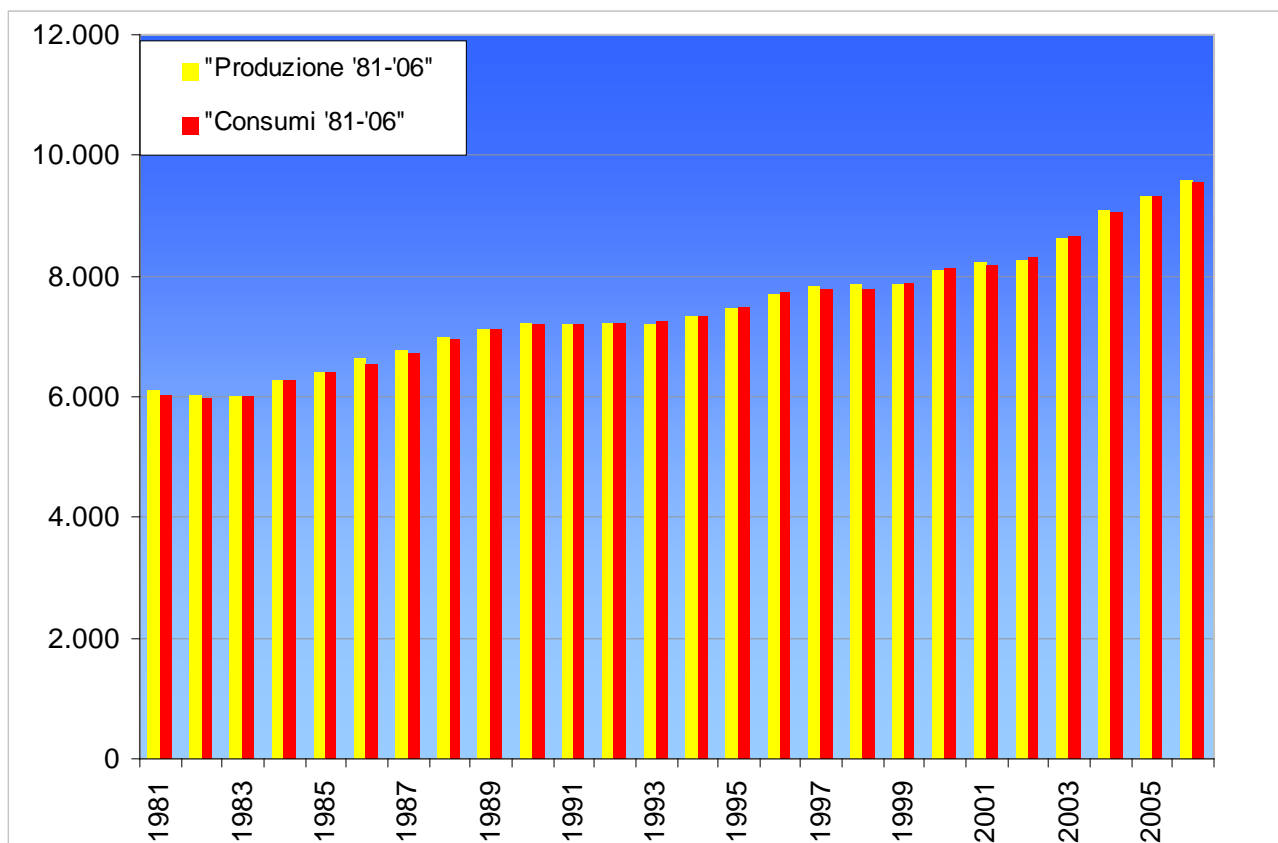


Figura 1.2 - Confronto tra produzione e consumi annuali nel mondo [Mtep]
(Fonte British Petroleum)

In tabella 1.4 sono riportati i consumi di energia primaria dei cinque Paesi che maggiormente hanno attinto dalle riserve fossili nell'anno 2005. Analizzando i dati emerge subito una correlazione diretta tra consumi e reddito pro-capite, con la sola eccezione della Russia (dove si riscontrano elevati consumi pro-capite pur in presenza di bassi redditi). I cinque paesi più energivori (nell'ordine Usa, Cina, Russia, Giappone ed India) insieme consumano il 51,9% dell'energia primaria globale e, pertanto, sicuramente rappresentano uno spaccato significativo di una tendenza planetaria.

Nazione	Consumi [Mtep]	Abitanti [Milioni di individui]	Consumi pro-capite [tep/persona]	Reddito pro-capite [\$/persona]
Usa	2.102	296,9	7,1	41.399
Russia	599	142,5	4,2	11.041
Giappone	436	127,7	3,4	30.615
Cina	1.465	1.308,9	1,1	7.198
India	376	1.097,1	0,3	3.320

Tabella 1.4 - Consumi e redditi pro-capite del 2005 nei paesi più energivori
(dati tratti da www.bp.com, www.eni.it, www.globalgeografia.com)

In tabella 1.5 sono riportati i consumi pro-capite nei Paesi a più alto reddito con la sola esclusione del Lussemburgo tenuto fuori perché presenta peculiarità troppo particolari per essere assunto come punto di riferimento per l'intero pianeta (in Lussemburgo il reddito pro-capite è elevatissimo: 71.800 dollari, gli abitanti sono pochi, appena 451.600, l'estensione geografica è molto piccola, appena 2.586 km²).

Nazione	Consumi [Mtep]	Abitanti [Individui]	Consumi pro-capite [tep/persona]	Reddito pro-capite [\$/persona]
Norvegia	14	4.600.000	3,1	42.364
USA	2.102	296.900.000	7,1	41.399
Irlanda	15	4.000.000	3,7	40.610
Islanda	1	300.000	3,7	35.115
Danimarca	17	5.400.000	3,2	34.740
Canada	215	32.200.000	6,7	34.273
Hong Kong	23	6.900.000	3,3	33.479
Austria	26	8.200.000	3,2	33.432
Svizzera	15	7.400.000	2	32.571
Qatar	21	800.000	25,8	31.397

Tabella 1.5 - Consumi e redditi pro-capite del 2005 nei paesi più ricchi
(dati tratti da www.bp.com, www.eni.it, www.globalgeografia.com)

Si può verificare che in media nei Paesi citati in tabella 1.5 il consumo pro-capite di energia primaria è pari a 6,6 tep/persona (la media mondiale attualmente non supera gli 1,5). Questo valore è molto prossimo agli standard di Usa e Canada, ma è anche considerevolmente distante da una media mondiale di 1,5 tep/persona.

Cosa potrebbe succedere se da domani tutto il mondo iniziasse a consumare 6,6 tep/persona? In altri termini, potrebbero tutti gli abitanti della Terra vivere con gli agi e secondo gli standard di vita tipici della prima economia al mondo?

Per tentare di dare risposta a questo interrogativo, anzitutto dobbiamo chiederci quanti saremo domani. Nel 1950 la popolazione della Terra ammontava a meno di 2,6 miliardi di individui, mentre a metà 2006 aveva superato i 6,5 miliardi; in 56 anni, la popolazione mondiale è cresciuta del 150% (+1,6% all'anno). Secondo l'U.S. Census Bureau, nel 2050 la Terra sarà popolata da 9,4 miliardi di individui; nei prossimi 44 anni, dunque, si prevede che la popolazione

mondiale sia destinata a crescere del 45% (+0,8% all'anno). Tenendo conto di tale previsione di incremento, se da domani ogni individuo iniziasse a divorare risorse primarie per 6,6 tep/persona, le riserve fossili giungerebbero ad esaurimento in poco più di 17 anni. Abbiamo così definito per l'autonomia da fonte fossile un limite inferiore di 17 anni ed uno superiore di 82. Scenari più verosimili consentono di collocare all'interno di tale intervallo un valore più realistico. Infatti, viste le attuali tendenze energetiche e demografiche, non è realistico ipotizzare la costanza di consumi e popolazione; né è verosimile uno scenario che prevede una crescita immediata dei consumi annui dal valore attuale di 1,5 fino a 6,6 tep/persona. In termini globali, con una popolazione di 6,5 miliardi di persone, i consumi fossili annui dovrebbero praticamente esplodere da 9.555 ad oltre 43.200 Mtep. E quadruplicare la capacità produttiva dei sistemi energetici installati non è proprio uno scherzo da poco.

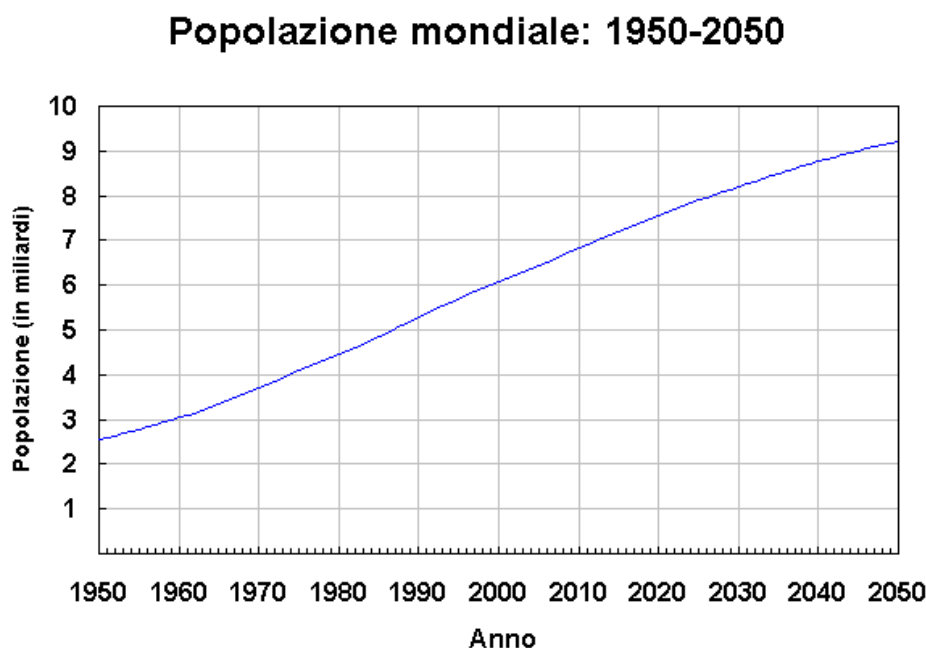


Figura 1.3 – Popolazione mondiale 1950 – 2050
Fonte: U.S. Census Bureau, data base internazionale, versione dell'aprile 2005

In realtà, uno scenario realistico deve tenere conto sia di un cospicuo incremento dei consumi pro-capite, sia di una prevista crescita della popolazione. Entrambi gli incrementi sono coerenti con il desiderio di un'umanità mai paga del benessere raggiunto: così, i maggiori consumi

energetici sono un presupposto essenziale per sostenere stili di vita agiata, mentre la crescita della popolazione è una conseguenza dell'allungamento della speranza di vita tipicamente connesso a condizioni di maggior benessere. Fermo restando un tasso di incremento della popolazione pari allo 0,8% all'anno, ipotizzando una crescita dei consumi pro-capite del 2% (valore tendenziale di crescita dei consumi mondiali annui negli ultimi 25 anni), del 3% all'anno (valore tendenziale di crescita dei consumi mondiali negli ultimi 5 anni) e del 12% (massimo incremento annuo dei consumi continentali negli ultimi 25 anni), si ricava per l'autonomia da fonte fossile un valore di oltre 37 anni. In tabella 1.6, sono presentati diversi valori dell'autonomia al variare dei tassi di incremento della popolazione mondiale e dei consumi pro-capite.

		Tasso annuale di crescita dei consumi annuali pro-capite		
		2,0%	3,0%	11,5%
Tasso annuale di crescita della popolazione	0,2%	47	40	24
	0,8%	42	37	23
	2,0%	36	33	22

Tabella 1.6 - Autonomia del mondo in funzione dei consumi e della popolazione [anni]

Dai dati di tabella 1.6, si ricava che un valore verosimile dell'autonomia da fonte fossile è compreso tra i 22 ed i 47 anni ovvero trattasi di qualche decennio. In ogni caso, da un punto di vista tecnico esiste un bel problema energetico: occorre, infatti, organizzare la migrazioni verso altre fonti energetiche in grado di sostituire quelle fossili. Si tratta di una sfida molto impegnativa, particolarmente volendo privilegiare fonti rinnovabili. In quest'ultimo caso, infatti, oltre che sui sistemi di produzione, sarebbe necessario intervenire sulle reti di distribuzione per adeguarle alle caratteristiche di eventuali nuovi vettori energetici e integrarle di opportuni sistemi di accumulo in grado di compensare la disponibilità intermittente tipica delle fonti rinnovabili. Per esempio, si faccia riferimento ad un impianto fotovoltaico di ultima generazione: se la potenza di picco è pari a 1 kWe (il pedice "e" indica grandezze di tipo elettrico) alle latitudini dell'Italia meridionale peninsulare si possono generare circa 1.400-1.500 kWh/anno. Un impianto tradizionale da 1 kWe

ed alimentato con fonti fossili al limite può funzionare ininterrottamente per tutto l'anno potendo così arrivare a produrre 8.760 kWh/anno. Dunque, con il fotovoltaico per poter disporre tutto l'anno di una potenza di 1 kWe occorre installare una potenza di picco 5-6 volte superiore ed affiancare all'impianto un sistema che accumuli il surplus di produzione nelle ore di effettivo funzionamento e lo restituisca quando la fonte solare non è disponibile. E' chiaro che, pur avendo ancora qualche decennio per adottare idonei provvedimenti, non è il caso di perdere tempo; inoltre, poiché l'entità dell'urgenza di una soluzione è inversamente proporzionale ai tassi annuali di crescita dei consumi pro-capite, incamminandosi prima possibile verso politiche di risparmio energetico, è possibile prolungare i tempi di una transizione verso nuove fonti energetiche, così da avere più tempo per valutare alternative ed attuare rimedi.

1.3 IL PROBLEMA ECONOMICO

Cosa si può dire a livello economico? Anche qui conviene partire brutalmente da dati certi. In figura 1.4, sono riportati i costi storici dell'energia dal 1980 al 2005 e le previsioni degli stessi fino al 2030. Si evidenzia che i valori storici di prezzo sono attualizzati al 2005; si ricorda, poi, che $1 \text{ MBtu} = 0,17 \text{ barili di petrolio} = 2,4 \times 10^{-3} \text{ tep}$.

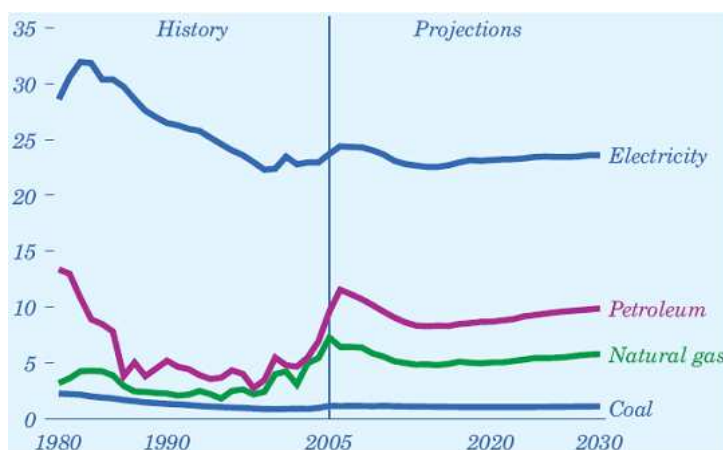


Figura 1.4 - Prezzi dell'energia espressi in moneta del 2005 [dollari/MBtu]
(diagramma tratto da "Annual Energy Outlook 2007", fonte DOE/EIA)

Rispetto ai prezzi del 1980, per le fonti di energia primaria è chiaramente evidente una tendenza al ribasso per il carbone, al rialzo per il gas naturale, mentre il petrolio, dopo una brusca discesa delle quotazioni nei primi anni '80 ed un periodo di stasi a cavallo degli anni '90, è oggi incanalato in un deciso movimento rialzista in virtù del quale si sta portando a ridosso dei massimi storici. In generale, le fonti fossili oggi non sono sicuramente a buon mercato, costando ben di più rispetto ai minimi degli anni '90; pur tuttavia, gli attuali livelli di prezzo non dovrebbero preoccupare più di tanto: il mondo, in passato, ha già dovuto fronteggiare situazioni critiche derivanti da tensioni politiche internazionali, mentre oggi il rialzo dei prezzi sembra essere riconducibile ad una forte domanda che ha determinato migliori condizioni di vendita per l'offerta. Questa considerazione è anche confermata dalla curva dei prezzi dell'energia elettrica: pur trattandosi di energia di seconda specie (ovvero derivata dalla conversione di energia primaria), il prezzo è andato gradualmente diminuendo in una fase iniziale per poi mantenersi pressoché costante negli ultimi anni durante i quali, invece, le fonti fossili si sono apprezzate. Poiché l'energia elettrica rappresenta una bella fetta dell'energia consumata nel mondo, ciò significa che innovazione tecnologica e liberalizzazione dei mercati sono finora riusciti a compensare gli incrementi di costo dei combustibili ovvero della principale materia prima dei sistemi di generazione elettrica. Di fatto, poiché l'assolvimento delle necessità primarie umane in buona misura è riconducibile alla disponibilità di energia elettrica, si può concludere che per i singoli cittadini (o almeno per quelli che prima avevano facilità di accesso a fonti energetiche per bisogni primari) l'analisi economica non sembra evidenziare particolari criticità.

Confrontando il diagramma di figura 1.1 con l'analogo di figura 1.5, è possibile fornire alcune plausibili interpretazioni dei dati riportati in figura 1.3. Dal confronto, sostanzialmente emerge che all'inizio degli anni '80 il mix di fonti energetiche privilegiava il petrolio mentre nucleare e gas naturale rivestivano ruoli di minor importanza. Successivamente, il peso della fonte petrolifera è diminuito, mentre il nucleare (nonostante il disastro di Chernobyl) ed il gas naturale hanno iniziato a guadagnare quote nel mercato della produzione di energia; in termini di peso, poi,

sono rimasti invariati sia il carbone (che, nonostante l'economicità, è stato probabilmente penalizzato dalle campagne ambientaliste che da sempre lo dipingono come inquinante) e l'idroelettrico (che, pur essendo una fonte di energia rinnovabile, oltre certi limiti non può crescere essendo vincolato dalla disponibilità di bacini idrici in quota). Negli ultimi 25 anni la domanda di energia da fonte fossile è cresciuta del 58%; nello stesso periodo, i consumi petroliferi hanno registrato una crescita inferiore al 36%. Si può concludere senza ombra di dubbio che negli ultimi 25 anni c'è stato un forte ridimensionamento del peso della fonte petrolifera. Oggi il petrolio risente più da vicino della concorrenza del gas naturale; e così, dopo una prima fase in cui il prezzo del petrolio è bruscamente calato per avvicinarsi a quello del gas naturale, a partire dalla seconda metà degli anni '90 i due combustibili hanno registrato un andamento dei prezzi sostanzialmente simile (vedi figura 1.4).

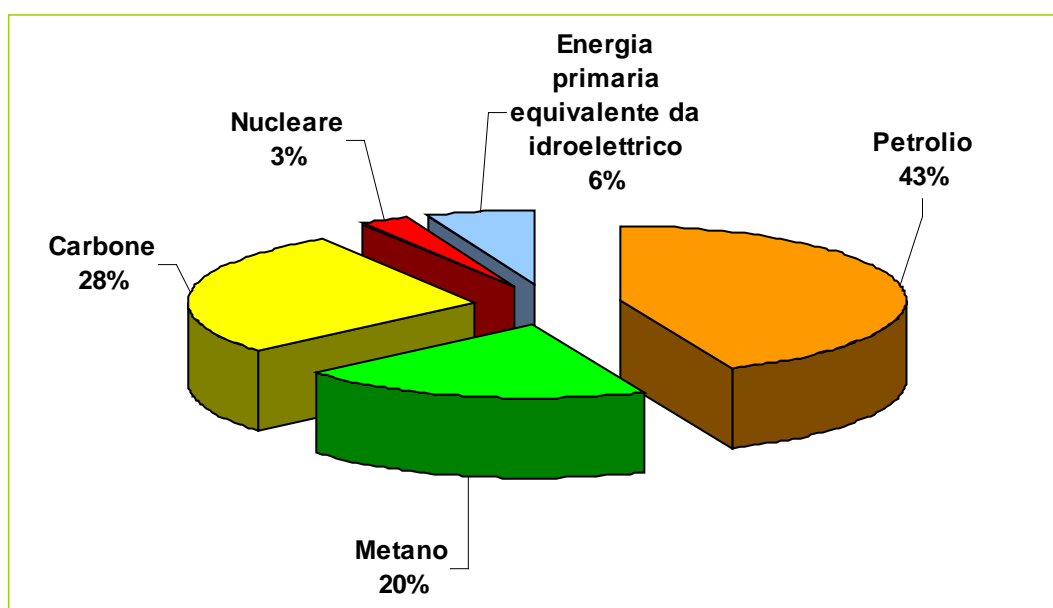


Figura 1.5 - Mix di fonti energetiche nel 1981

In generale, si ha quasi la sensazione che la curva di domanda energetica sia poco sensibile alle oscillazioni di prezzo: gli Italiani, per esempio, non hanno affatto intenzione di rinunciare alle comodità di uno stile di vita altamente energivoro; al massimo si sforzano di cercare soluzioni che contemporaneamente consentono di consolidare benessere e portafoglio.

Conferme in tal senso provengono dall'analisi dei prezzi al consumo di benzina senza piombo e gasolio per autotrazione. Nelle tabelle 1.7 e 1.8 sono riportati i prezzi medi della benzina senza piombo e del gasolio per autotrazione, nonché le variazioni degli stessi maturate tra dicembre 1996 e dicembre 2006. Nello stesso periodo, l'indice ISTAT dei prezzi al consumo per famiglie di impiegati ed operai è cresciuto del 22,4%. Come si può vedere, a livello di prezzi al consumo entrambi i carburanti hanno evidenziato un rincaro; nel caso del gasolio, poi, l'incremento è stato pari a più del doppio dell'inflazione. A livello di prezzo industriale, il rincaro è stato ancora più consistente: +75% per la benzina, +103% per il gasolio. D'altronde, nello stesso periodo il prezzo del greggio, depurato del fattore di cambio ed a livello di FOB (acronimo per Free On Board ovvero prezzo di acquisto con carico su nave o oleodotto), tra dicembre del 1996 e dicembre del 2006, ha registrato un incremento del 148%.

Mese di riferimento	Prezzo industriale	Iva	Accisa	Prezzo al consumo
Dic-96	258,86	149,5	527,96	936,32
Dic-06	451,99	203,2	564	1.219,19
Var. 96-06	75%			30%

Tabella 1.7 - Variazioni del prezzo della benzina senza piombo in Italia tra il 1996 ed il 2006

Mese di riferimento	Prezzo industriale	Iva	Accisa	Prezzo al consumo
dic-96	252,22	121,27	386,04	759,52
dic-06	512,23	185,64	416	1.113,87
var. 96-06	103%			47%

Tabella 1.8 - Variazione del prezzo del gasolio per autotrazione in Italia tra il 1996 ed il 2006
(dati tratti da www.sviluppoeconomico.gov.it)

Nonostante gli aumenti, i consumi italiani da fonte petrolifera negli ultimi dieci anni sono diminuiti di appena un 9%. In Italia, pur con un generale disappunto per i continui rincari di benzina e gasolio, il numero di automobili in circolazione continua a crescere senza sosta. Così come la potenza mediamente installata sui singoli veicoli. Mentre, però, in passato la stragrande maggioranza delle automobili era spinta da motori a benzina, oggi gli Italiani privilegiano

propulsori a gasolio che, notoriamente, sono caratterizzati da minori consumi specifici. Una tendenza in linea con i movimenti di prezzo del gasolio che in termini percentuali è cresciuto più della benzina. In ogni caso, benché siano tanti coloro che si lamentano degli accresciuti costi del carburante, ben pochi rinunciano all'auto o riducono le percorrenze; e solo nelle città più congestionate, la gente ricorre massicciamente al servizio pubblico; ma questo accade non tanto per ragioni economiche, quanto piuttosto per evitare difficoltà di parcheggio e stress da traffico o per adeguarsi alla diffusa tendenza di imporre limiti alla circolazione nei centri urbani più densamente abitati. Non sorprende, dunque, che negli ultimi anni gli Italiani abbiano tutto sommato accettato considerevoli rincari della bolletta energetica quasi senza colpo ferire. E questo è un atteggiamento abbastanza comune nei Paesi industrializzati.

Diversamente, nei paesi più poveri larghissime fasce sociali conducono esistenze al limite dell'umano in condizioni di degrado, abbandono, fame e povertà. Costoro non chiedono energia, bensì acqua, cibo, farmaci. In buona parte di tali Paesi, se si provvedesse ad eseguire massicce installazioni di sistemi di produzione dell'energia, probabilmente si avrebbe un'offerta superiore alla domanda e buona parte della capacità produttiva rimarrebbe inutilizzata. E ciò è tanto più significativo se avviene anche in Paesi ricchi di fonti energetiche.

Infine, esiste la fascia dei Paesi in via di sviluppo che al fine di supportare la propria crescita economica hanno iniziato a consumare sempre più energia avvicinandosi a livelli di consumo pro-capite tipici dei Paesi occidentali. E' sicuramente il caso di Cina ed India, che ormai sono saldamente tra i paesi più energivori del mondo, assommando da soli oltre un terzo della popolazione mondiale. Ed è proprio dal lontano Oriente che arrivano le maggiori pressioni in termini di domanda.

Lo scenario internazionale dunque è così caratterizzato: circa un sesto della popolazione mondiale, pur consumando energia in forma molto intensiva, non ha problemi a sostenere gli accresciuti costi della bolletta energetica; oltre un terzo della popolazione mondiale è voracemente affamato di energia e continuerà a chiederne ancor di più fintantoché la bolletta energetica sarà

ampiamente ripagata dalla crescita economica; circa la metà della popolazione mondiale, infine, recita ruoli di secondo piano o addirittura è troppo povero per preoccuparsi dei problemi energetici del mondo. I paesi in via di transizione verso economie liberiste ed industriali sono all'origine dell'incremento dei costi dell'energia che si è innescato a partire dalla seconda metà degli anni '90; pur tuttavia, nonostante questa considerevole spinta, i prezzi (rettificati) dell'energia non hanno ancora raggiunto i massimi storici. Come è possibile ciò, se i timori di un prossimo esaurimento delle fonti fossili non sono proprio infondati e le prospettive future di domanda energetica sono eccellenti? Premesso che in un mondo sempre più globalizzato, è piuttosto difficile interpretare con semplici modelli interdipendenze complesse, due considerazioni possono fornire qualche utile indicazione: in primo luogo, i principali Paesi produttori continuano ad immettere sul mercato massicce quantità di energia per soddisfare le proprie necessità di fare cassa; in secondo luogo, nel mondo manca una piena coscienza della più o meno prossima necessità di operarsi per un affrancamento dalle fonti fossili. Così per ora l'offerta è sempre riuscita a soddisfare la domanda ed è sempre stato possibile raggiungere un sostanziale equilibrio senza particolari tensioni inflazionistiche.

Nelle tabelle successive sono riportate le capacità produttive ed il reddito pro-capite nei cinque Paesi che maggiormente estraggono petrolio, gas naturale e carbone. Considerato che, con un reddito pro-capite di 28.534 \$/abitante, nel 2005 l'Italia era 21sima in classifica, analizzando le tabelle 1.9, 1.10 e 1.11 immediatamente balza all'occhio che tra i primi 5 produttori di petrolio (che rappresentano il 43,4% dell'offerta totale), solo gli USA rientrano tra i primi 20 al mondo per reddito pro-capite; ugualmente, tra i primi 5 produttori di carbone (che rappresentano il 43,4% dell'offerta totale), solo USA ed Australia hanno questo requisito; tra i primi 5 produttori di gas naturale (che rappresentano il 43,4% dell'offerta totale) nell'elenco dei 20 Paesi più ricchi sono presenti USA; Canada e Norvegia.

Paese produttore	Produzione annua [Mtep]	Incidenza nazionale	Reddito pro-capite [\$/abitante]	Posizione reddito
Arabia Saudita	527	13,5%	15.229	47
Russia	470	12,1%	11.041	62
USA	313	8,0%	41.399	3
Iran	207	5,3%	7.980	74
Cina	181	4,6%	7.198	87

Tabella 1.9 - Produzione annua e reddito pro-capite dei primi 5 produttori di petrolio nel 2005¹

Paese produttore	Produzione annua [Mtep]	Incidenza nazionale	Reddito pro-capite [\$/abitante]	Posizione reddito
Cina	1120	38,4%	7.198	87
USA	580	19,9%	41.399	3
Australia	207	7,1%	30.897	14
India	201	6,9%	3.320	123
Sud Africa	138	4,7%	12.161	55

Tabella 1.10 - Produzione annua e reddito pro-capite dei primi 5 produttori di carbone nel 2005¹

Paese produttore	Produzione annua [Mtep]	Incidenza nazionale	Reddito pro-capite [\$/abitante]	Posizione reddito
Russia	538	21,4%	11.041	62
USA	469	18,7%	41.399	3
Canada	167	6,7%	34.273	7
Iran	91	3,6%	7.980	74
Norvegia	76	3,0%	42.364	2

Tabella 1.11 - Produzione annua e reddito pro-capite dei primi 5 produttori di gas naturale nel 2005¹

In ognuno dei tre mercati, il primo produttore è sempre un Paese con reddito pro-capite non elevato; i primi 5 produttori insieme rappresentano sempre una fetta consistente del totale, particolarmente nel caso del carbone; in generale, si può verificare che nei Paesi meno ricchi la produzione è finalizzata soprattutto all'esportazione, mentre nei Paesi ricchi è destinato all'auto-consumo. Per taluni Paesi, petrolio, carbone e gas naturale rappresentano una consistente fonte di reddito per cui non deve meravigliare che, di fronte ad una domanda pressante, l'offerta si sia

¹ Dati tratti da www.bp.com, da World Energy and Economic Atlas, edizione 2006 scaricabile da www.eni.it e World Fact Book 2006, scaricabile da www.eia.org.

adeguata non solo aumentando i prezzi, ma anche incrementando la capacità estrattiva, un fattore che ha sicuramente contribuito a calmierare i prezzi dell'energia. D'altronde, prima che, verso la metà degli anni '90, Cina ed India iniziassero la spettacolare ascesa economica tuttora in corso, i costi dell'energia erano molto contenuti (vedi tabella 1.4).

L'altra semplice ragione che ha impedito che i prezzi dell'energia schizzassero può essere messa in relazione con una mancata percezione del rischio di esaurimento delle fonti fossili. Nessuno, infatti, è oggi in grado di stimare in maniera completamente attendibile l'entità delle riserve. Di fronte a questa incertezza, il mondo ha scelto di non dare troppo credito alle parole dei pessimisti, ma piuttosto di rimanere alla finestra in attesa di conferme. Perché mai mettere i buoi davanti al carro prima del tempo? D'altronde, tutte le stime più pessimistiche sono ampiamente smentite dalle opinioni di chi fa rilevare che le riserve non sono diminuite in maniera sostanziale negli ultimi anni, che grazie a nuove tecniche di estrazione sicuramente sarà possibile sfruttare immense riserve attualmente inaccessibili (soprattutto in fondo al mare), che negli ultimi decenni le scoperte di nuovi giacimenti sono diminuite solo per mancanza di investimenti. Il nodo cruciale è capire se è stato raggiunto il picco di produzione; è opinione diffusa che allorquando sarà stato consumato il 50% delle riserve mondiali, sarà più conveniente tagliare la produzione e far schizzare i prezzi, piuttosto che proseguire con margini unitari relativamente modesti. Ed è chiaro che fino al raggiungimento del picco, è estremamente improbabile che il mondo si attivi per organizzare la transizione verso altre fonti energetiche.

Certamente, però, nel lungo periodo il problema si presenterà, particolarmente se i tassi di crescita economica di Cina ed India dovessero mantenersi ancora per lungo tempo sui livelli attuali; o anche se i Paesi più poveri dovessero ricalcare più da vicino gli straordinari sviluppi economici di talune regioni asiatiche. Ma nel breve è piuttosto improbabile che possa manifestarsi un problema energetico di origine economica. Probabilmente, nuove ed improvvise barriere economiche (capaci di precludere alla maggioranza della popolazione consumi energetici prima sostenuti agevolmente) potrebbero nascere solo se, approssimandosi l'esaurimento delle fonti fossili, il mondo si

convincesse della necessità di reperire nuove fonti energetiche ed iniziasse ad organizzare la migrazione verso queste ultime. Dunque, l'ipotesi di un problema di tipo economico svincolato da ragioni tecniche sembra poco realistico.

1.4 IL PROBLEMA AMBIENTALE

Cosa è possibile dire da un punto di vista ambientale? Sicuramente, a partire dagli anni '50 nei Paesi industrializzati la vita media è cresciuta considerevolmente. Questo è un dato certo che accompagna sempre le fasi iniziali di sviluppo economico ovvero energetico perché senza l'ultimo non può esserci l'altro. Nel World Fact Book 2000, la vita media nel mondo è stimata pari a 64 anni, contro la stima italiana di 79,03. Dal World Fact Book 2007 si ricava che una stima della vita media nel mondo è pari a 65,82 anni, da confrontare con il valore italiano di 79,94. In primo luogo si nota che in Italia (che può tranquillamente essere un'effigie di tutti i Paesi industrializzati) le aspettative di vita media sono parecchio sopra la media mondiale; in secondo luogo, le aspettative di vita media continuano a crescere; in terzo luogo, la velocità di crescita del mondo è maggiore (tra il 2000 ed il 2007 la vita media è cresciuta del 2,84% nel mondo, dell'1,15% in Italia). Poiché è indubbio che esiste un legame diretto tra consumi energetici e prospettive di vita, si può concludere che, nonostante i timori di un maggiore rischio ambientale connesso ad uno sfruttamento energetico intensivo, le aspettative di vita media continuano a crescere sia nei Paesi dove tale valore è già alto, sia nel resto del mondo. In base a questa semplice considerazione si potrebbe concludere che il costo ambientale fin qui sostenuto è stato ampiamente ripagato dai benefici.

Il problema, però, è capire se c'è un prezzo ambientale già maturato ma non ancora saldato. Per esempio, quanto è concreto il rischio che le future generazioni possano pagare un danno sanitario per le azioni dei progenitori? Per escludere questa malaugurata ipotesi occorre verificare che le conseguenze ambientali dello sfruttamento energetico intensivo già in atto non siano causa di

inversione del trend di crescita delle aspettative di vita media: diversamente, per sostenere gli attuali livelli di qualità della vita, già oggi il mondo avrebbe contratto una cambiale che le future generazioni sarebbero chiamate a saldare. E questo sarebbe insostenibile nel lungo periodo. Diversamente, un modello di sviluppo sostenibile dovrebbe essere capace di soddisfare le necessità del presente lasciando alle generazioni future la possibilità di fare altrettanto.

1.4.1 L'impatto ambientale della produzione energetica

Poiché abbiamo verificato che oltre l'80% dei consumi mondiali assolve con fonti fossili, in questa fase concentreremo la nostra attenzione esclusivamente sull'impatto ambientale dei processi combustivi.

I processi di produzione dell'energia da fonte fossile impattano sull'ambiente sia in termini di eco-compatibilità che di eco-sostenibilità. Nel primo caso occorre operare azioni di monitoraggio sulla qualità degli effluenti allo scarico (controllando la composizione specifica dei fumi), nel secondo sulla quantità dei flussi immessi in ambiente (ragionando su tutte le specie anche quelle apparentemente innocue). In un caso, bisogna eseguire una valutazione di impatto ambientale a livello locale, nell'altro a livello globale. Per esempio, in generale un processo di combustione libera in ambiente H_2O , CO_2 ed agenti inquinanti; l'analisi di eco-compatibilità serve per controllare che questi ultimi siano presenti nei fumi in concentrazioni nulle o minimali ovvero tali da non comportare effetti nocivi per le persone, gli animali e le piante presenti nelle immediate vicinanze; l'analisi di eco-sostenibilità deve verificare che tutte le specie immesse in ambiente attraverso i fumi non comportino alterazioni sostanziali della normale composizione dell'atmosfera. Naturalmente, piccole immissioni in ambiente esterno di H_2O e CO_2 non sono in grado di comportare sostanziali alterazioni della composizione tipica dell'atmosfera; diversamente, grandi

immissioni potrebbero generare effetti apprezzabili, non necessariamente negativi, ma comunque in grado di alterare consolidati equilibri bio-climatici.

1.4.2 Eco-compatibilità dei processi combustivi

Lo sfruttamento intensivo delle fonti fossili mediante processi di combustione genera effluenti inquinanti. Ragionando in termini di eco-compatibilità, occorre considerare che tutti i processi combustivi rilasciano in ambiente monossido di carbonio (CO), ossidi di azoto (NO_x), ossidi di zolfo (SO₂, SO₃), benzene (C₆H₆), idrocarburi policiclici aromatici (IPA, PAH), diossine e particolato sospeso. In tutti i casi, si tratta di sostanze inquinanti più o meno nocive per la salute umana.

Il monossido di carbonio (CO) è un gas inodore, incolore e insapore che si produce nelle combustioni incomplete di materiali contenenti carbone e nei veicoli a motore. Esercita un'alta tossicità perché, se inalato, contrae legame con l'emoglobina riducendo o annullando la capacità del sangue di trasportare ossigeno. In atmosfera, per legge le concentrazioni devono essere inferiori al valore medio di 10 mg/m³ se calcolato in un arco temporale di 8 ore e di 40 mg/ m³ in 1 ora; il limite tossicologico è 1,145 mg/ m³. Inalare CO provoca progressivamente alterazioni psicomotorie quali diminuzione della vigilanza, dell'acuità visiva, della capacità di apprendimento, di esecuzione di test manuali, alterazioni cardiovascolari e polmonari, deficit respiratori, coma e morte.

Il benzene è un solvente organico ampiamente utilizzato nell'industria chimica. E' un costituente del petrolio grezzo, nonché un importante componente delle benzine commerciali. Il benzene è estremamente cancerogeno: nell'uomo può determinare in popolazioni professionalmente esposte un aumento dei casi di leucemia mieloide acuta e di anemia aplastica; esercita una marcata azione immuno-soppressiva; addirittura, l'esposizione a concentrazioni elevate può determinare la

morte per depressione del sistema nervoso centrale con perdita di coscienza o per comparsa di aritmie cardiache fatali.

Gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) derivano da processi pirolitici e combustioni incomplete. Il benzopirene è il componente più pericoloso sia per quantità che per effetto tossicologico. Gli IPA sono generalmente cancerogeni e tendono ad indurre tumori polmonari nei soggetti esposti professionalmente ad elevate concentrazioni. Negli ultimi due decenni, nelle aree urbane è stato possibile ridurre le concentrazioni di IPA da oltre 100 ng/m³ fino a valori al di sotto dei 10 ng/ m³.

Gli ossidi di zolfo (SO₂, SO₃) sono gas generati alla combustione di fossili contenenti zolfo (carbonio, petrolio grezzo). Le fonti di maggior emissione sono le raffinerie di petrolio, gli impianti di energia elettrica, le industrie della carta, le fonderie e il riscaldamento per uso domestico. Gran parte dello zolfo presente nei combustibili si ritrova allo scarico come SO₂ che, in contatto con H₂O tende a generare acido solforico (H₂SO₄) che rappresenta la maggior componente acida dell'inquinamento atmosferico. Insieme ad altri prodotti non solforati, l' SO₂ ed i suoi derivati costituiscono lo smog pesante che affligge in inverno le aree maggiormente urbanizzate. Negli ultimi anni, grazie all'impiego di combustibili con minor tasso di impurità, è stato generalmente possibile ricondurre i livelli di SO₂ nelle aree urbane al di sotto dei 100 mg/m³.

Gli ossidi di azoto, prevalentemente NO e NO₂, sono gas naturalmente presenti in atmosfera, tuttavia l'apporto maggiore proviene dai processi di combustione. In atmosfera, NO si trasforma in NO₂ se entra in contatto con agenti ossidanti, per esempio ozono (O₃). Gli NO_x, insieme agli idrocarburi, generano smog fotochimico. In atmosfera, per legge le concentrazioni devono essere inferiori al valore medio di 200 mg/m³ se calcolato in un arco temporale di 1 ora.

Le diossine sono un gruppo di 210 composti chimici aromatici policlorurati formati da carbonio, idrogeno, ossigeno e cloro. Di questi, 17 sono considerati tossicologicamente rilevanti. Sono sostanze inodori, termostabili, insolubili in acqua e fortemente liposolubili. Le diossine sono tossiche per l'organismo umano, perché tendono ad accumularsi nei tessuti viventi. Un'esposizione

prolungata, anche a livelli minimi, può recare danni. E' stato accertato che sugli animali generano effetti cancerogeni ed interferiscono con il normale sviluppo fisico. L'effetto sugli esseri umani è ancora controverso, ma da molti governi sono riconosciuti come agenti cancerogeni.

Con il termine particolato sospeso è uso indicare un agglomerato miscelaneo di sostanze organiche ed inorganiche, solide e liquide derivanti da fonte naturale (per esempio da eruzioni vulcani o polveri) o da attività antropiche (per esempio da processi combustivi per attività civili ed industriali). Chimicamente il particolato risulta composto da carbonio, metalli di varia natura, nitriti e solfati. L'effetto dannoso sulla salute dipende dalle dimensioni delle polveri inalate: le particelle con diametro superiore ai 10 μm non destano particolari preoccupazioni poiché sono filtrate nelle vie respiratorie alte; tra i 10 ed i 2,5 μm (PM10), le polveri riescono a penetrare nei bronchi e nei bronchioli; infine le particelle ultrafini (PM2,5), con diametro ancora più piccolo, sono le più pericolose perché riescono a raggiungere gli alveoli e qui, accumulandosi, riescono a passare nel sangue. Molti autorevoli studi epidemiologici hanno evidenziato correlazioni tra inalazioni di polveri sottili ed effetti nocivi sulla salute. Gli effetti sanitari più evidenti sembrano essere a carico dell'apparato respiratorio e cardio-circolatorio; inoltre, nei ratti sono stati accertati effetti mutageni che lasciano pensare all'esistenza di rischi analoghi anche per gli uomini. Uno studio del 2005 diffuso da Legambiente Padova ha calcolato che l'esposizione dalla nascita alla concentrazione di PM10 di 52,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (valore piuttosto comune nelle città di Padova, Vicenza e Verona) ridurrebbe le aspettative di vita media di oltre 13 mesi rispetto a quanto stimabile ipotizzando livelli di concentrazione inferiori ai 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (che rappresentano l'obiettivo di concentrazione massima da raggiungere entro il 2010 secondo indicazioni UE).

L'inquinante più preoccupante è il particolato. Tutti gli altri, infatti, in linea teorica, sono facilmente abbattibili come testimoniato dalla drastica riduzione dei livelli di emissioni inquinanti conseguita negli ultimi anni. Il merito è anzitutto ascrivibile ai progressi conseguiti nella progettazione e nella costruzione di caldaie e bruciatori in grado di garantire più elevati rendimenti di combustione; in secondo luogo, è riconducibile al massiccio utilizzo di filtri e catalizzatori

ovvero di sistemi di abbattimento degli inquinanti a valle; infine, bisogna considerare il miglioramento dei processi di raffinazione che è oggi in grado di fornire combustibili commerciali con minor contenuto di impurità. Anche le diossine, da sempre il tallone di Achille di inceneritori e termovalorizzatori, oggi non preoccupano più come una volta: grazie ad una più accurata progettazione delle camere di combustione ed all'adozione di sistemi di raccolta differenziata più selettivi è oggi possibile contenere a livelli accettabili la variabilità della composizione del combustibile da rifiuto ovvero è possibile ricondurre le emissioni di diossine a livelli molto contenuti. Diversamente, abbattere il particolato è molto più complesso. La pericolosità delle polveri sottili, infatti, è inversamente proporzionale alle dimensioni; dunque, le polveri più pericolose sono anche le più difficile da filtrare. La raccolta del PM₁₀ e del PM_{2,5} necessita di filtri molto costosi e nemmeno è in grado di fornire sufficientemente garanzie in termini di affidabilità, particolarmente in caso di processi combustivi non stazionari (per esempio, nei motori alternativi o nei transitori delle caldaie domestiche). Proprio per questo motivo, soprattutto dietro la spinta dell'industria automobilistica, la ricerca scientifica ed industriale è soprattutto rivolta verso i meccanismi di comprensione dei fenomeni di formazione del particolato. Essendo problematico l'abbattimento a valle (che, invece, ha fornito eccellenti risultati per CO, NO_x e IPA), l'obiettivo è cercare di contenere a monte la formazione di polveri sottili.

In ogni caso, nel momento in cui sarà possibile abbattere le emissioni di particolato anche per i combustibili ad elevato tenore di carbonio, il problema dell'eco-compatibilità dei processi combustivi in linea teorica non appare insormontabile. A patto, naturalmente, di mantenere sempre in perfetta efficienza i sistemi di produzione e gli apparati di abbattimento dei fumi. Diversamente, i rischi sanitari potrebbero rivelarsi sottostimati. Recenti statistiche, infatti, evidenziano una forte crescita dei casi di tumore: in un recente articolo pubblicato da "L'Espresso" è stato spiegato che "in Italia la crescita dei casi di tumori è a livelli da epidemia"; addirittura sarebbero state individuate 54 aree (comprendenti 311 Comuni) dove sono stati registrati un numero elevatissimo di casi che "disegnano una radiografia della Penisola avvelenata che corre da Pieve Vergonte, un

paese all'ombra della fabbrica Enichem nel profondo Nord della provincia di Verbania, alla punta inferiore della Sicilia, con Gela e il suo petrolchimico”. Certamente, finché le aspettative di vita media continuano a crescere sembrerebbe di poter confermare quanto già detto ovvero che i benefici siano prevalenti. Occorre, però, considerare che in campo sanitario cause ed effetti non sono sempre contestuali e che talvolta gli effetti possono evidenziarsi anche a distanza di decenni dalla manifestazione delle cause: per esempio, tra esposizione a polveri di amianto e manifestazione di un mesotelioma possono essere necessari anche trent'anni. Già ora, per esempio, le attività di origine antropica potrebbero avere generato alterazioni ambientali tali che di qui a trenta anni potrebbe esserci una riduzione della vita media. Ma questo non può essere né confermato, né smentito da alcuno. Anche perché non è possibile fare previsioni circa i futuri progressi della scienza medica, né tanto meno tenere conto dell'evoluzione darwiniana della specie umana.

1.4.3 Eco-sostenibilità dei processi combustivi

L'analisi del problema dell'eco-sostenibilità dei processi combustivi non può che partire da una generica reazione di combustione. Un combustibile è un composto di carbonio ed idrogeno che in contatto con un agente ossidante reagisce liberando calore. Una generica reazione di combustione, dunque, è del tipo:



Immediatamente balza agli occhi che tutti i processi combustivi generano CO₂ e H₂O. Solamente, nel caso dell'idrogeno (n=0) è possibile bruciare senza produrre CO₂; ugualmente, solamente nel caso di carbone e monossido di carbonio (m=0) la reazione di combustione non genera H₂O. Pertanto, bruciando combustibili fossili su larga scala si immettono in atmosfera grosse quantità di CO₂ e H₂O. Se finora le immissioni di H₂O apparentemente non hanno originato

problemi, non è possibile dire altrettanto per la CO₂, che è accusata di essere la principale causa del riscaldamento globale della Terra.

In generale, il fenomeno è riconducibile ai crescenti livelli di concentrazione dei gas cosiddetti “climalteranti” presenti in atmosfera. Tali gas, essendo trasparenti alla radiazione solare ed assorbendo la radiazione terrestre, consentono di trattenere in atmosfera parte del calore irraggiato dalla Terra verso lo spazio esterno. Grazie a questo fenomeno, la temperatura media della Terra si mantiene attorno leggermente al di sotto dei 15°C, contro i circa -19°C che si avrebbero in presenza di un'atmosfera perfettamente trasparente alle radiazioni in uscita. I principali gas climalteranti sono CO₂ e CH₄.

Negli ultimi 150 anni il livello di concentrazione della sola CO₂ è passato dai 270 ppm di metà XIX secolo agli attuali 380 ppm. Così, rispetto al passato la Terra disperde oggi per irraggiamento meno calore che, addensandosi negli strati più bassi dell'atmosfera ha determinato rispetto al 1860 (a partire dal quale sono disponibili dati storici attendibili), un incremento della temperatura di oltre 1°C. Nel 1860, infatti, la temperatura dell'atmosfera terrestre registrava un'anomalia negativa di 0,4°C ovvero era pari a circa 14,6°C rispetto alla media di 15°C (che è stata calcolata ricostruendo gli andamenti di temperatura lungo tempi geologici). Oggi, registriamo valori di temperatura prossimi ai 15,4°C ovvero siamo in una fase di anomalia positiva di circa 0,4°C. Secondo l'IPCC (l'Intergovernmental Panel on Climate Change, associazione scientifica indipendente recentemente insignita, insieme ad Al Gore, del premio Nobel per la pace) la temperatura media globale è aumentata di 0,74°C dal 1906 al 2005. Secondo l'IPCC, inoltre, mentre nei decenni passati la temperatura cresceva di 0,06°C ogni 10 anni, negli ultimi 50 anni la temperatura è aumentata di 0,13°C per decennio e più recentemente ha raggiunto un tasso di crescita di 0,025°C all'anno.

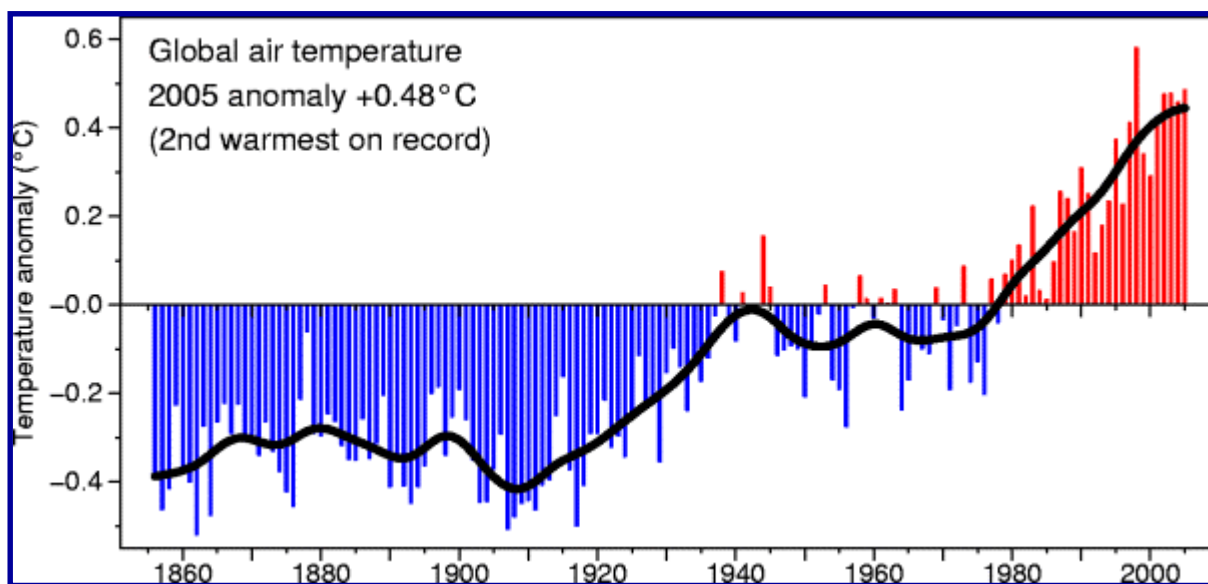


Figura 1.6 – Andamento dell'anomalia della temperatura media dal 1860

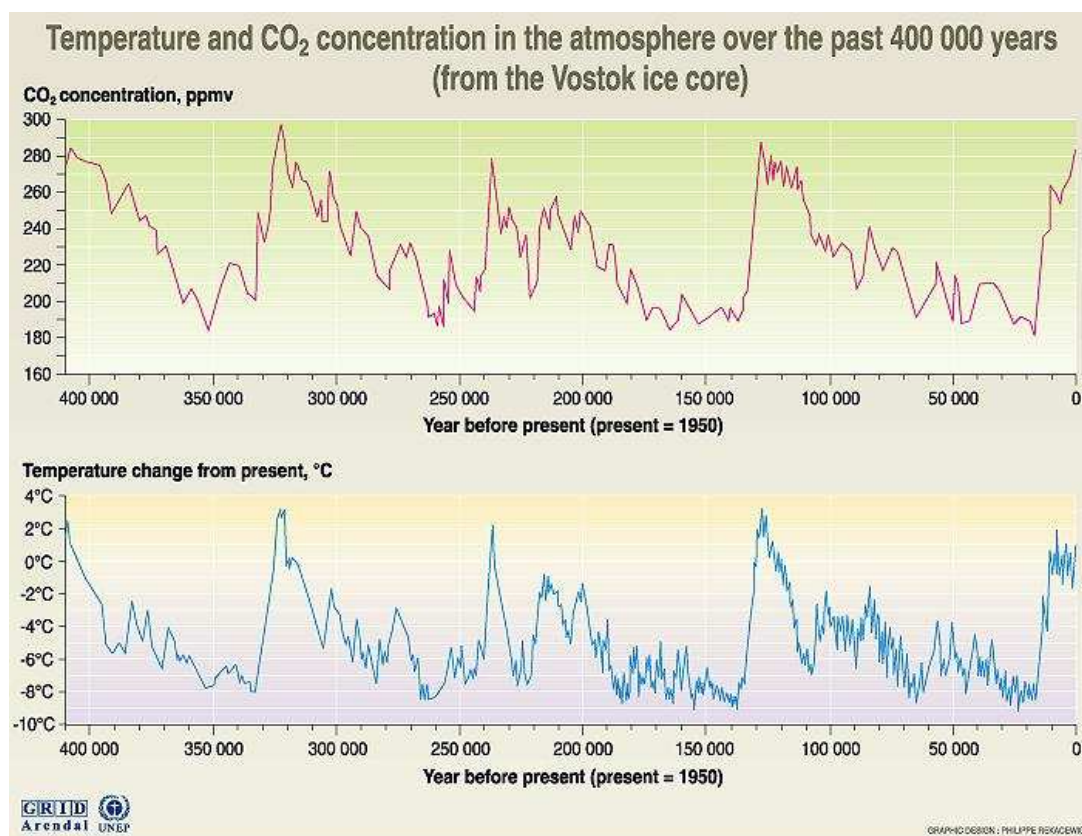
Questo riscaldamento ha già determinato una netta contrazione del volume complessivo dei ghiacciai perenni e della calotta artica, nonché un lieve riscaldamento degli strati superficiali del mare.

Variazioni consistenti dei livelli di concentrazione della CO_2 in atmosfera si sono già realizzate nella storia del pianeta, ma mai di così forte intensità e rapidità. Ma, allora, da dove può trarre origine il riscaldamento globale?

In figura 1.7, sono riportati gli andamenti della concentrazione atmosferica di CO_2 e della temperatura media negli ultimi 400.000. Questi diagrammi sono stati ricostruiti mediante tecniche di indagine basate su carotaggi nei ghiacci. I due andamenti sono sostanzialmente coincidenti: è evidente una stretta correlazione tra concentrazioni di CO_2 e temperature. Dunque, l'attuale fase di surriscaldamento della Terra è con ragionevolezza riconducibile all'incremento di CO_2 dell'atmosfera. Ma questi è necessariamente causato da azioni antropiche? Non può essere di origine naturale?

Analizzando i dati di figura 1.7, si ricava che la concentrazione di CO_2 negli ultimi 400.000 anni è sempre oscillata tra 180 e 300 ppm. Diversamente, negli ultimi decenni abbiamo

abbondantemente sfiorato il limite superiore geologico di 300 ppm, come ben evidente in figura 1.8 che riporta dati sperimentali. Dunque, siamo in una fase che verosimilmente il mondo non ha mai conosciuto. Il sospetto che alla base di tutto vi siano azioni antropiche sembra più che legittimo.



Source: J.R. Petit, J. Jouzel, et al. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core in Antarctica, *Nature* 399 (3June), pp 429-436, 1999.

Figura 1.7 - Concentrazione di CO₂ e temperatura in atmosfera negli ultimi 400.000 anni

A questo punto occorre domandarsi: “*Dove ci può portare il riscaldamento globale?*”.

L’IPCC ha individuato diversi scenari. Quello giudicato più attendibile sembra prevedere un innalzamento della temperatura media globale di circa 3°C al 2100. In queste condizioni, anzitutto i modelli previsionali indicano che:

- livello del mare potrebbe aumentare tra i 28 ed i 43 cm;
- la calotta polare artica durante i mesi estivi potrebbe scomparire o, comunque, ridursi del 90% rispetto all’attuale estensione;

- i ghiacciai delle catene montuose poste alle media e base latitudine potrebbero subire drastiche riduzioni;
- gli estremi climatici (grosse ondate di calore, periodi di intensa siccità, alluvioni ed uragani) potrebbero divenire sempre più frequenti.

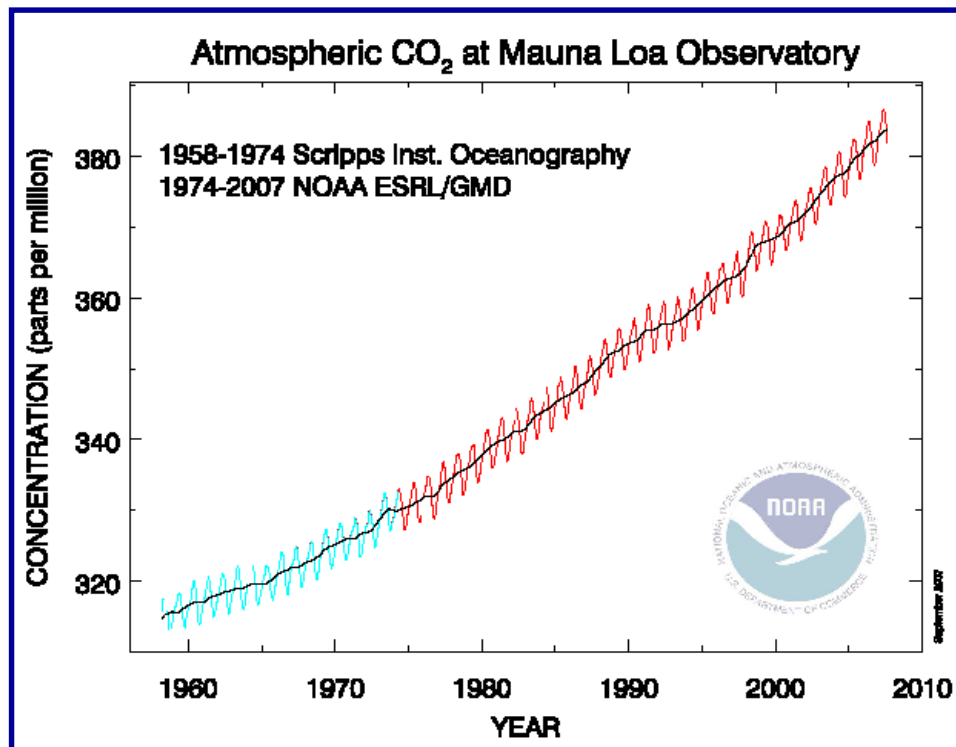


Figura 1.8 – Andamento misurato della concentrazione di CO₂ dal 1958 ad oggi

Desertificazione, sommersione dei territori costieri, uragani potrebbero essere ben poca cosa rispetto ad una potenziale catastrofe climatica che potrebbe innescarsi ove mai dovesse alterarsi la corrente del Golfo che nell'Atlantico assolve la funzione di temperare climi altrimenti molto più estremi

Di fronte all'impossibilità di ottenere al momento evidenze certe dell'azione antropica sul clima, occorre domandarsi se davvero vale la pena continuare con l'attuale ritmo di consumo di fonti fossili.

Per contrastare il fenomeno del riscaldamento globale senza ricadute negative in termini di benessere, in prima analisi il mondo può pensare di puntare tutto sul risparmio energetico. Ma una volta ottimizzato tutto ciò che è migliorabile, il giorno in cui il mondo volesse stabilizzare o ridurre ulteriormente i livelli di CO₂ in atmosfera ci sarebbero solo due strade:

- tagliare i consumi da fonte fossile;
- procedere al sequestro della CO₂ dall'atmosfera.

Escludendo l'ipotesi di ridurre i consumi energetici rinunciando ad agi e comfort ormai praticamente irrinunciabili, la prima ipotesi è subordinata all'individuazione di sostituti che non abbiano il “vizio” di generare gas climalteranti.

Diversamente non rimane che seguire la seconda strada; in questo caso, però, occorre considerare che in qualunque maniera si decida di procedere occorre spendere ulteriore energia che, se proveniente da fonte fossile, contribuirebbe ad incrementare le immissioni in atmosfera vanificando parte dello sforzo compiuto.

Anche impiegare idrogeno (come caldeggiato da qualcuno perché brucia senza produrre CO₂) è falsa soluzione del problema. Sebbene molto abbondante, in natura non esiste allo stato elementare; pertanto, occorre produrlo ovvero è necessario spendere energia, ricadendo così nel medesimo problema del sequestro se l'energia primaria proviene da fonte fossile.

Il problema dell'eco-sostenibilità dei processi combustivi non è di facile soluzione. Nel momento in cui il mondo dovesse rendersi conto dell'insostenibilità degli attuali ritmi di sfruttamento delle riserve fossili le conseguenze potrebbero essere drammatiche anche alti motivi. Se fosse in gioco la sopravvivenza dell'intero pianeta, le fasce sociali più forti lavorerebbero di concerto per precludere ai più deboli l'accesso alle fonti fossili. In questa malaugurata ipotesi, le fasce più deboli soccomberebbero e sarebbero eliminate dallo scenario internazionale parecchi consumatori di energia. Questo processo di selezione (praticamente un genocidio) avrebbe termine solamente nel momento in cui i più forti si convincessero di poter attingere energia in modi e forme compatibili con il proseguimento della loro vita con inalterato livello di agio e comfort. Dunque,

considerazioni di carattere ambientale potrebbero fare esplodere un problema energetico estremamente pericoloso; e questo rischio potrebbe manifestarsi prima ancora di ragioni tecniche o economiche.

1.5 IL PUNTO DI VISTA FILOSOFICO

Il problema energetico è chiaramente complesso. Abbiamo già visto che per ciascun punto di vista fin qui considerato non esiste una soluzione univoca, bensì un ventaglio di possibili alternative. Se, poi, consideriamo che spesso le visioni di tecnici, economisti ed ambientalisti sono in contrasto reciproco, è evidente che il ruolo più delicato riguarda il coordinamento delle singole competenze. Il punto di vista filosofico, dunque, è determinante per gli indirizzi strategici. Se per esempio fosse necessario ridurre del 70% i consumi di energia primaria quali dovrebbero essere le spese energetiche da tagliare e quali da salvaguardare? Gli anziani sicuramente spingerebbero per mantenere immutati i servizi sanitari, mentre semmai i più giovani non accetterebbero di buon grado un ridimensionamento dei servizi di trasporto. Individuare l'ordine di priorità tra visione tecnica, economica ed ambientale è impresa ardua; ancora più difficile è controllare che gli eventuali benefici di una decisione non siano controbilanciati da effetti negativi non previsti. Per esempio, se per tutelare le ragioni degli ambientalisti si scegliesse di adottare sistemi di abbattimento e controllo delle emissioni eccessivamente onerosi, potrebbe esplodere un problema economico; se in conseguenza di ciò divenisse impossibile garantire per tutti livelli minimi delle condizioni igienico-sanitarie potrebbero scoppiare epidemie, problemi sociali e guerre; ed ecco che le migliori intenzioni ambientaliste potrebbero mutarsi in qualcosa di assolutamente negativo per la salute generale del pianeta. Più, in generale, il punto di vista filosofico dovrebbe prescindere da competenze specifiche per rispondere esclusivamente a ragioni di coscienza civica e morale.

Non bisogna sottovalutare l'importanza del punto di vista filosofico, l'unico che già oggi potrebbe far partorire decisioni estremamente importanti per il futuro del pianeta. Visto che tecnici ed economisti preferiscono stare alla finestra in attesa di maggiori conferme, che, nonostante certe pressioni ambientaliste, non vi è unanime consenso che il riscaldamento globale dipenda dal massiccio uso di combustibili fossili, decisioni meno attendiste potrebbero essere maturate soltanto all'interno di un dibattito filosofico improntato a criteri prudenziali.

In un'ottica prudenziale, l'obiettivo di tutto il mondo dovrebbe essere rivolto alla conservazione dei delicati equilibri bio-climatici che nel corso di milioni di anni hanno permesso lo sviluppo e l'evoluzione dell'umanità. Una qualunque alterazione degli habitat naturali sfocia sempre in nuovi stati di equilibrio non necessariamente peggiori dei precedenti, ma semplicemente diversi. E la diversità è un rischio perché la Terra potrebbe scegliere di "liberarsi" dell'uomo. E' quanto paventato dal bio-chimico inglese James Lovelock, postulatore dell'ipotesi di Gaia secondo cui "la Terra si comporta come un singolo sistema capace di autoregolazione, costituito da componenti fisiche, chimiche, biologiche e umane". Lovelock ritiene che le attività antropiche costituiscono una minaccia per Gaia che potrebbe decidere di non subire più passivamente il cambiamento, ma di reagire. Secondo lo scienziato e ricercatore, la presenza umana *"sta visibilmente debilitando il pianeta, come fosse una malattia. E ci sono quattro esiti possibili: distruzione degli organismi patogeni invasori, infezione cronica, distruzione dell'ospite e simbiosi, vale a dire relazione di mutuo beneficio tra ospite e invasore"*.

Per capire in che termini è il rapporto tra umanità e pianeta è possibile fare riferimento ad uno strumento statistico studiato per valutare l'impatto ambientale dei consumi: l'impronta ecologica. Il postulato principale è che ogni attività umana comporta dei costi ambientali dovuti ai prelievi di risorse naturali e misurati in funzione delle superfici impegnate dal tipo di consumo. Il concetto di impronta ecologica è stato introdotto nel 1996 da Mathis Wackernagel e William Rees. A partire dal 1999 il WWF diffonde periodicamente i risultati di calcolo aggiornati. Nel Living Planet Report 2006, l'impronta ecologica relativa all'anno 2003 è stata valutata tenendo conto

dell'estensione dei terreni agricoli, delle zone a pascolo e degli spazi di pesca (necessari per produrre cibo e fibre), delle foreste (per la produzione di legname), delle occupazioni necessarie per assorbire i rifiuti prodotti nel generare energia e dagli ingombri delle infrastrutture energetiche. L'impronta ecologica si misura in ettari globali ovvero in suoli di estensione superficiale di 1 ettaro e biocapacità (ovvero capacità di produrre risorse ed assorbire rifiuti) pari alla media mondiale.

Nel 2003, l'impronta ecologica del mondo era di 14,1 miliardi di ettari globali ovvero, 2,2 ettari globali per persona (assumendo una popolazione di 6,3 miliardi di individui). Il dato deve essere confrontato con una disponibilità totale di area produttiva di 11,2 miliardi di ettari globali ovvero 1,8 ettari per persona. Nel 2003 la domanda ha superato l'offerta di circa il 25%; con questi ritmi di sfruttamento delle risorse ecologiche, alla Terra servono circa 15 mesi per rigenerare quanto consumato in un anno.

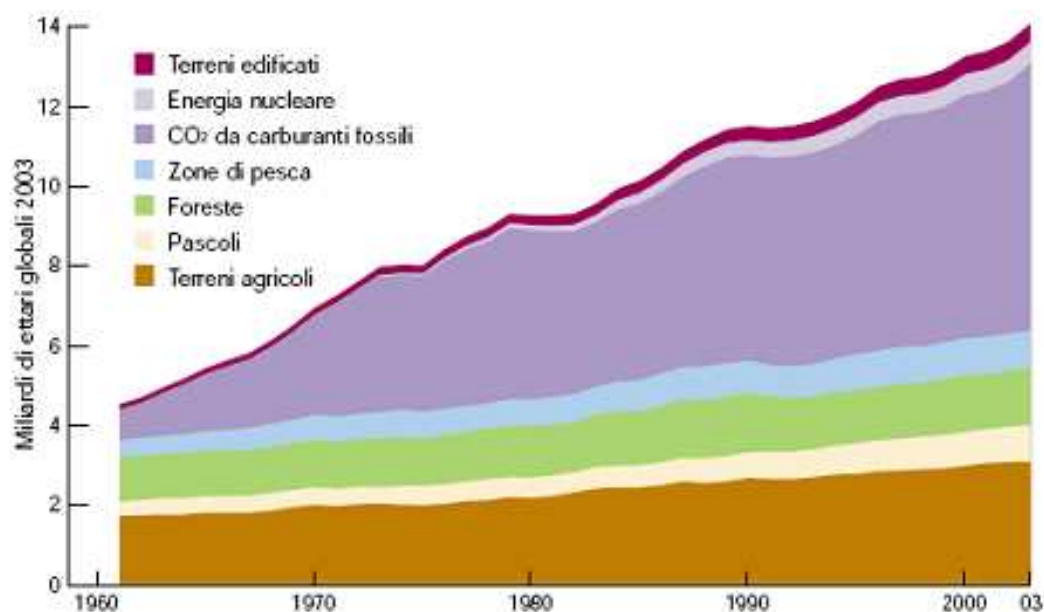


Figura 1.9 - Impronta ecologica suddivisa per componenti, 1961-2003

Si può verificare che, a partire dagli anni '80, l'impronta ecologica è cresciuta più velocemente della bio-capacità globale; da circa 3 decenni, dunque, lo sfruttamento ecologico del pianeta eccede la normale capacità di rigenerazione delle risorse. Non è pensabile rimanere in

questa situazione troppo a lungo: si rischia di esaurire le riserve biologiche del pianeta, interferendo con la capacità a lungo termine di rinnovarle. Riducendo il campo di indagine a livello locale, è possibile individuare i Paesi che maggiormente attingono risorse ecologiche e che, pertanto, maggiormente gravano sul bilancio ecologico totale. Infatti, il confronto tra l'impronta di una regione e la sua bio-capacità mostra se esiste una riserva ecologica o un deficit.

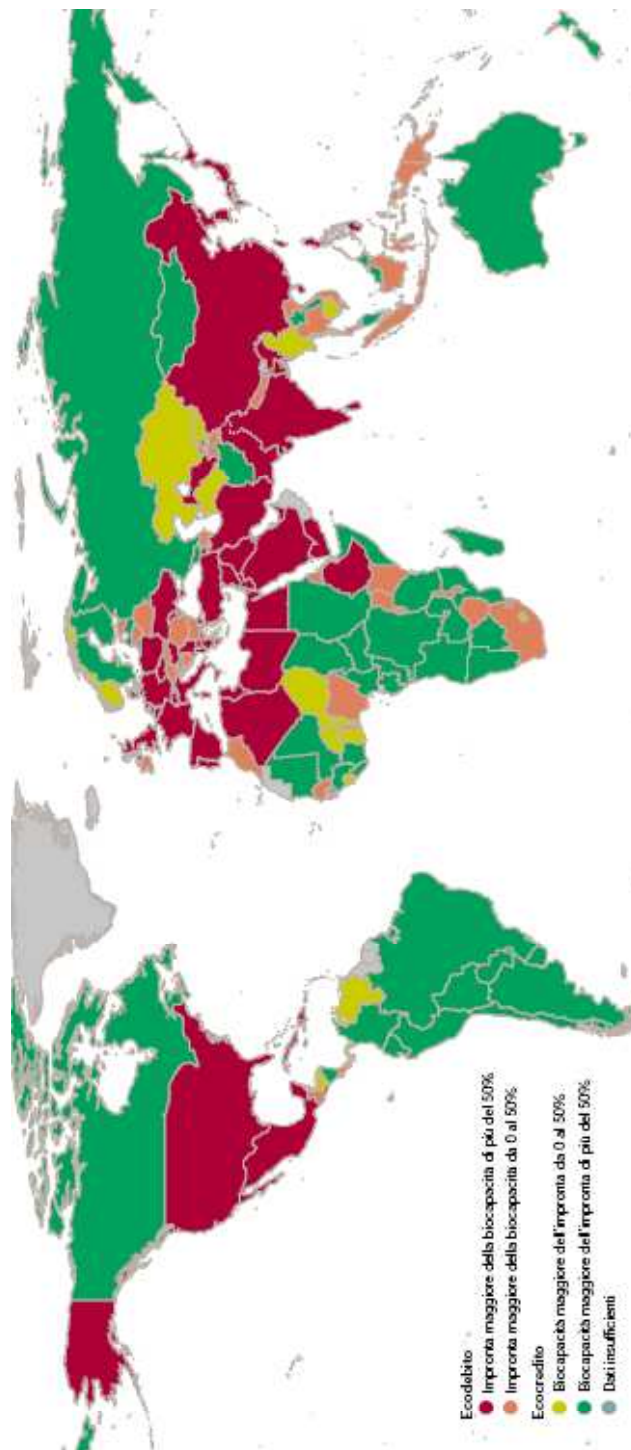


Figura 1.10 - Mappa dei Paesi eco-debitori ed eco-creditori nel 2003

Malgrado la loro enorme bio-capacità, gli Stati Uniti hanno il maggiore deficit pro-capite: ogni statunitense in media usa 3,7 ettari globali in più di quanti siano disponibili nel territorio degli USA. Segue l'UE con un deficit pro-capite di 2,6 ettari globali: questa regione sta usando più del doppio della sua bio-capacità. In generale si può verificare che la maggioranza dei Paesi con elevato debito ecologico è distribuita lungo la fascia mediana del mondo, comprendente Europa centro-meridionale, Africa settentrionale, Medio Oriente, Asia orientale e Messico. All'altro estremo si trova l'America Latina che, con riserve di 3,4 ettari globali per persona, ha un'impronta media pro-capite pari a solo un terzo di quella disponibile.

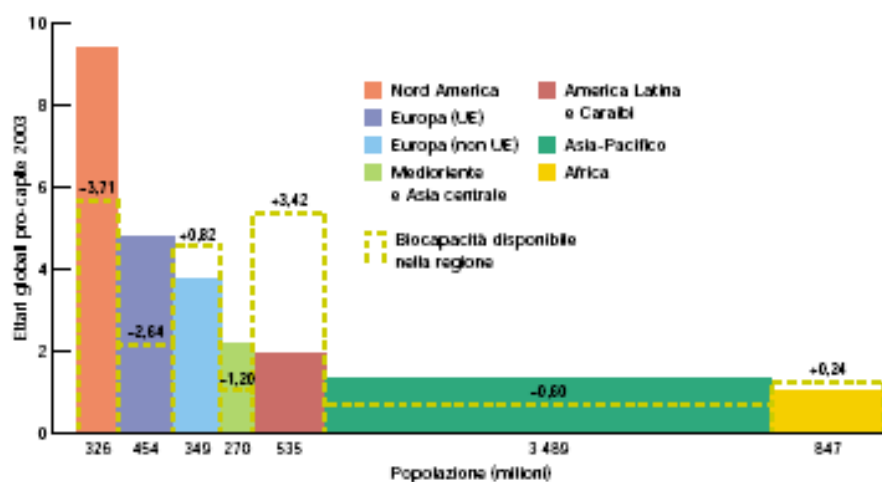


Figura 1.11 - Impronta ecologica e biocapacità suddivise per regioni, 2003

Tra il 1992 e il 2003, l'impronta media per persona nei Paesi a reddito basso o medio è cambiata poco, mentre nei Paesi ad alto reddito è aumentata del 18%. Negli ultimi 40 anni dei Paesi a basso reddito è stata di 0,8 ettari globali per persona.

L'impronta ecologica ha parecchi limiti, conosciuti dagli stessi autori. In primo luogo riducendo tutti i valori ad un sola unità di misura, la terra, distorce la rappresentazione di problemi complessi e multidimensionali. In secondo luogo, poiché i consumi sono riferiti alle sole risorse rinnovabili, il problema della dipendenza da risorse non rinnovabili (minerali, petrolio) rimane trascurato. Infine, relativamente alla categoria di territorio dell'energia (ovvero la voce di maggior

peso) occorre considerare che possono sorgere problemi di stima del rendimento e, con approccio semplicistico, sono conteggiate le immissioni della sola CO₂ ovvero sono trascurate tutte le altre specie inquinanti. Da ciò deriva che il reale danno ambientale è molto maggiore di quello che l'impronta ecologica mostra; pertanto, anche se si dovesse raggiungere la parità tra consumi misurati e disponibilità, questo non garantirebbe un'effettiva soluzione dei problemi ecologici.

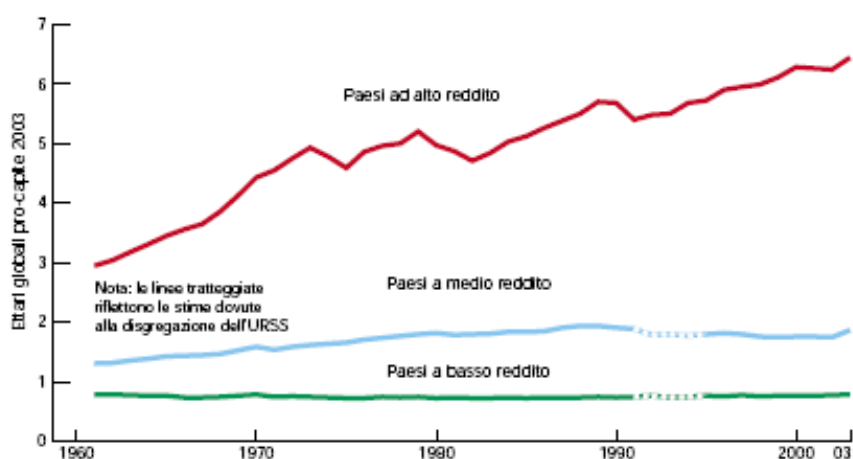


Figura 1.12 - Impronta suddivisa per reddito pro-capite medio

In ogni caso, pur con i suoi limiti, il calcolo dell'impronta ecologica fornisce indicazioni di estrema attenzione. La principale conclusione riguarda il modello di sviluppo che il mondo sta portando avanti: non è certamente possibile sostenerlo nel lungo periodo. Per centrare l'obiettivo di uno sviluppo eco-sostenibile esistono due sole strade: o si riducono i consumi ecologici unitari o si accresce la bio-capacità pro-capite. La scelta tra le due strade è essenzialmente un problema morale. Nel primo caso, tutti i Paesi con elevato deficit ecologico dovrebbero accettare un forte ridimensionamento del proprio livello di benessere. Nel secondo, assunto che la capacità globale di generare risorse naturali non può crescere oltre certi limiti, non rimane che far diminuire la popolazione. Chi deve pagare dazio sull'altare dello sviluppo sostenibile? Tocca forse ai Paesi ricchi rinunciare al superfluo per aprirsi ai più poveri? O piuttosto è meglio costringere i Paesi più prolifici (caratterizzati da un alto tasso di natalità) ad attuare politiche di drastica riduzione della

popolazione (e – si badi bene - non di semplice contenimento!)? Cosa sceglieranno di fare politici e governanti? Temo che alla fine si sceglierà di non decidere, di fatto optando per una terza soluzione: il genocidio. Sottovalutando il problema dell'eco-sostenibilità, infatti, si rischia di fare ciò che è più volte accaduto in natura: quando una popolazione cresce eccessivamente, prima o poi intervengono carestie che attuano un processo di selezione naturale basato sulla legge del più forte. Salvo che, essendo stato deliberatamente ignorato ogni scrupolo morale, nel caso in questione si tratterebbe piuttosto di uno sterminio di massa.

Probabilmente, in questo momento, l'obiettivo del mondo non è tanto affrontare un problema energetico di natura tecnica, economica o ambientale, quanto piuttosto di gestire la crisi morale che sta investendo l'umanità. L'attendismo in attesa di conferme spesso maschera una volontà di posporre nel tempo sacrifici e rinunce nella speranza di trovare nuove soluzioni o escamotage che consentano di aggirare il problema. Attivarsi senza riserve per ridurre le immissioni in atmosfera di CO₂, spingere sulle fonti rinnovabili, sostenere la ricerca scientifica in campo energetico sono azioni che, forse, sarebbe il caso di avviare già oggi per cercare di riportare l'equilibrio tra impronte ecologiche e bio-capacità. Certamente potrebbe accadere di scoprire di avere fatto inutili sacrifici perché, semmai, in un futuro non troppo lontano il reperimento di nuove fonti energetiche dimostrerà l'infondatezza di certi timori. D'altronde, però, ignorare certi segnali potrebbe suscitare la rivolta di Gaia e le conseguenze potrebbero essere catastrofiche per buona parte dell'umanità? Meglio, dunque, un'eccessiva prudenza o un ardimentoso coraggio? Se le spese saranno pagate soprattutto da chi non decide, il timore di scelte leggere e superficiali (se non proprio egoiste!) non è proprio mal posto.

2. LE FONTI FOSSILI

Le fonti fossili rappresentano oggi la principale fonte energetica del mondo.

In questo capitolo sarà inizialmente presentata una breve storia delle fonti fossili; l'obiettivo è mostrare che lo sviluppo delle civiltà umane a livello economico, sociale e culturale è avvenuto parallelamente alla disponibilità di fonti energetiche sempre più potenti. Oggi probabilmente siamo all'apice dello sviluppo raggiungibile con le fonti fossili. Per progredire ancora, probabilmente servono nuove fonti energetiche.

Nel resto del capitolo sarà presentata una rapida panoramica su carbone, petrolio e gas naturale. Si tratta, invero, quasi di una rassegna informativa, sicuramente poco esaustiva perché essenzialmente volta a trasferire nozioni elementari che favoriscano la comprensione di quanto contenuto nei capitoli successivi.

2.1 DALLA FORZA DEI MUSCOLI ALLA PREPOTENZA DELLE FONTI FOSSILI

L'uomo primitivo, circa un milione di anni fa, sfruttava solo i muscoli per assolvere le proprie esigenze vitali. Il primo vero passo significativo venne fatto quando cominciò a costruire strumenti che amplificavano le sue forze.

Mezzo milione di anni fa l'uomo imparò a dominare e a riprodurre a proprio piacere il fuoco che, dispensatore di calore, gli permise di sopravvivere durante le glaciazioni. Ben presto, la legna da ardere, il capostipite dei combustibili, divenne una nuova forma di energia usata anche per nuovi scopi: anzitutto per scaldare cibo (rendendolo meglio digeribile e conservabile) e poi per produrre

artificialmente la luce; ma l'uomo imparò anche a cuocere l'argilla per forgiare recipienti, a fondere la sabbia per produrre vetro, ad estrarre metalli dalle rocce e forgiarli per costruire strumenti e armi.

Circa diecimila anni fa l'uomo scoprì l'agricoltura e dette vita ai primi insediamenti stanziali. Nacquero così le prime forme di aggregazione politica e sociale. Con la diffusione delle coltivazioni agricole, poi, si moltiplicarono le risorse alimentari e la popolazione mondiale, sebbene molto lentamente, cominciò a crescere.

Quindi, circa cinquemila anni fa l'uomo cacciatore iniziò a coltivare la terra con l'aiuto di animali addomesticati: questo processo di passaggio dalla caccia all'agricoltura è detto rivoluzione neolitica e costituì, insieme alla padronanza del fuoco, il vero cambiamento nella diffusione della specie umana sulla terra.

Successivamente, lo sviluppo di una primitiva metallurgia ha determinato una maggiore capacità tecnologica che ha permesso di sfruttare altre fonti di energia (idrica ed eolica) e di migliorare il rendimento energetico nell'utilizzazione degli animali.

In ogni caso, fino alla prima metà del XVIII secolo, tutte le applicazioni energetiche dell'umanità erano basate su energia idraulica e/o eolica, trazione animale e combustione di legna o simili. Alla fine del XVIII secolo si stima che fossero installati mezzo milione di mulini idraulici, con una potenza media di 3-4 kW; i mulini ad acqua erano impiegati in ogni genere di attività: dalla macinazione del grano alla frammentazione dei minerali, dalla produzione di olio alla concia dei tessuti. I mulini a vento rinforzavano ulteriormente la capacità produttiva umana: la loro potenza in genere superava quella dei mulini ad acqua (da 10 a 20 kW per mulino), ma era limitata dall'andamento meno regolare dei venti. Fino a qualche secolo fa, dunque, l'umanità sfruttava unicamente fonti rinnovabili ovvero sostanzialmente inesauribili su scala umana dei tempi e con impatto ambientale praticamente nullo. In altri termini, per lungo tempo l'umanità ha seguito una linea di sviluppo del tutto eco-sostenibile.

Il grande salto nei consumi energetici è avvenuto in coincidenza di un'altra rivoluzione, non meno importante di quella neolitica. Alla base di tutto vi fu l'invenzione della macchina a vapore,

che consentì di sfruttare, sistematicamente e su larga scala, l'energia prodotta dalla combustione di una fonte abbondante, ma non rinnovabile: il carbone.

L'Inghilterra del XVIII secolo è il “luogo economico” nel quale avvenne la prima rivoluzione industriale, che pose le basi del moderno modo di produzione delle merci. All'inizio del '700, l'Inghilterra era già una monarchia costituzionale e si era formata una classe di ricchi borghesi ed imprenditori che investì ingenti capitali nell'industria meccanica e in quella tessile (miniere, mulini, filatoi).

Il grande impegno profuso in questi settori fece sentire la necessità di una maggiore disponibilità di energia meccanica. La macchina a vapore di Newcomen entrò in uso in Inghilterra nel 1725. I successivi miglioramenti apportati da Watt consentirono di aumentarne il rendimento energetico fino a sostituire quasi totalmente l'energia idraulica per far muovere i telai, nonché per scavare e trasportare il carbone. Prima dell'avvento della macchina a vapore, l'acqua che ostacolava gli scavi infiltrandosi nel fondo delle miniere era pompata in superficie per mezzo di ruote a pale mosse dalla corrente di fiumi e torrenti. Successivamente, le ruote ad acqua furono sostituite gradualmente dalle macchine a vapore che, alimentate a combustibile, non avevano più bisogno di avere nelle immediate vicinanze corsi d'acqua. La macchina a vapore divenne il vero emblema della rivoluzione in corso, perché con essa per la prima volta fu possibile produrre in maniera sistematica energia meccanica dalla conversione di calore; l'introduzione della macchina a vapore nelle fabbriche consentì di fatto la nascita del moderno modo di produzione.

Tra il '700 e l' '800 le macchine a vapore si diffusero anche nel resto dell'Europa, soprattutto nel settore tessile e dei trasporti civili e minerari (la locomotiva a vapore di Trevithick risale al 1804).

La storia energetica dell'uomo non si è fermata però al carbone. Il 29 agosto 1859 venne scavato con successo a Titusville in Pennsylvania (Stati Uniti), il primo pozzo di petrolio, ma fu necessario attendere circa vent'anni perchè qualcuno desse un sensibile impulso alla ricerca e alla commercializzazione di questo combustibile.

Nel 1880 un industriale americano, John Rockefeller, fondò la Standard Oil, destinata a diventare la prima grande compagnia petrolifera a livello mondiale. Qualche anno più tardi, la sua attività fu favorita da un altro personaggio, divenuto poi leggendario, Henry Ford, che producendo su scala industriale le prime automobili con motore a scoppio, determinò il definitivo superamento della trazione a vapore e pose le basi per l'ingresso nell'era del petrolio.

I bassissimi rendimenti di conversione dell'energia chimica del combustibile in energia meccanica determinarono un notevole incremento dei consumi energetici, ma l'elevata disponibilità di questa fonte di energia permise di soddisfare il crescente aumento di domanda di un prodotto che, rispetto al carbone, era più pratico da usare e più pulito. Così, quando iniziò a diffondersi su larga scala anche l'elettricità, il petrolio si impose come combustibile ideale per generare il vapore da far espandere in turbina nelle centrali termoelettriche, allorquando nelle vicinanze non era possibile installare centrali idroelettriche.

La domanda di petrolio, spinta dalla crescita industriale, dalla diffusione dell'automobile e dall'uso di elettricità, crebbe a dismisura in Europa ed USA, evidenziando per la prima volta che le riserve mondiali di combustibili fossili non erano illimitate e prima o poi si sarebbero esaurite. Pur tuttavia il petrolio ha dominato la scena mondiale per quasi tutto il '900; soltanto, dopo la crisi internazionale del 1973, causata dalla guerra del Kippur tra Egitto ed Israele, il mondo ha sentito l'esigenza di diversificare gli approvvigionamenti energetici ed ha iniziato la ricerca di nuove fonti energetiche, in particolare del gas naturale. In realtà, questo combustibile era noto all'umanità da lungo tempo; già in un manoscritto del 347 a.C., lo storico cinese Chang Qu descriveva uno strano gas che può essere usato per illuminare; quindi, toccò ad Alessandro Volta, circa 200 anni or sono, "scoprire" che le piccole bolle gassose che si formavano smuovendo i fondali limacciosi del lago Maggiore generavano una fiamma bluastra se messe in contatto con un fiammifero acceso. Ma è solo negli ultimissimi anni che il gas naturale si è imposto sullo scenario energetico mondiale.

A partire dall'inizio dell'Ottocento e per buona parte del Novecento, l'impiego di combustibili gassosi è stato praticamente limitato a qualche uso civile, per esempio l'illuminazione

stradale delle città; il gas impiegato a questi scopi, però, proveniva quasi esclusivamente dalla distillazione del carbone fossile. Per molto tempo, infatti, le componenti volatili che fuoriuscivano dai pozzi di petrolio sono state sprecate lasciando che bruciassero torce di superficie in prossimità degli impianti di estrazione del petrolio. Così sono andati in fumo svariati miliardi di metri cubi di gas naturale: uno dei maggiori sprechi di risorse che la storia ricordi.

L'Italia, da sempre povera di petrolio, è stato uno dei pochi Paesi dove il metano è stato utilmente impiegato come risorsa energetica fin dai primi anni della scoperta dei giacimenti in Valle Padana e nel Mare Adriatico. Il metano, infatti, ha dato un notevole contributo allo sviluppo industriale del Paese negli anni Cinquanta e Sessanta.

Nel resto del mondo, però, lo sfruttamento del metano è cominciato solo di recente. Anzitutto il successo del gas è stato determinato dalla sua elevata qualità ambientale e dallo sviluppo di tecnologie pulite ed efficienti per la generazione di elettricità da gas naturale, quali cicli combinati gas-vapore e repowering delle centrali esistenti mediante inserimento di unità supplementari turbogas. Ulteriori spinte sono provenute dalla scoperta di importanti giacimenti gassiferi (che ha portato il livello delle riserve accertate assai vicino a quello delle riserve petrolifere), ma soprattutto dalla realizzazione di infrastrutture per il trasporto internazionale del gas (metanodotti, terminali di liquefazione e di rigassificazione, navi metaniere).

L'intera Europa è attualmente attraversata da metanodotti sotterranei o sommersi; solo in Italia ne arrivano ben tre, provenienti dall'Olanda (da cui importiamo il 10% di gas), dalla Siberia (da cui ne importiamo il 25%) e dall'Algeria (da cui ne importiamo il 31%). Quest'ultimo è il Transmed, il primo metanodotto transmediterraneo che inizia a Oued Saf Saf, al confine tra Algeria e Tunisia, si snoda per 370 chilometri in Tunisia fino a giungere in Italia, ad oltre 1400 chilometri, passando con tubazioni sottomarine attraverso il canale di Sicilia.

Su lunghe distanze il gas naturale è trasportato in forma liquida. In questo modo, per esempio, il gas indonesiano giunge in Giappone e quello nigeriano negli Stati Uniti. Per rendere possibile questo trasporto, il gas deve essere liberato da impurità, portato a temperature molto basse

in appositi impianti di liquefazione, caricato su navi metaniere e scaricato al terminale di arrivo dove devono esistere idonei impianti per la rigassificazione, lo stoccaggio e l'immissione in una rete di trasporto o distribuzione.

Nel cammino storico-evolutivo del genere umano, è evidente, fortissima, la tensione verso modelli sociali e comunitari sempre più complessi ed articolati al fine di raggiungere migliori condizioni di vita. Il percorso di crescita seguito dall'umanità, però, è stato tutt'altro che lineare; l'exkursus storico di cui sopra, pur breve, dimostra che l'evoluzione storica del genere umano è avvenuta a salti, guarda caso sempre in corrispondenza di nuove disponibilità energetiche. Ogni nuova fonte di energia ha sempre ridimensionato i ruoli dei predecessori storici, sebbene mai nella storia è avvenuto che qualche fonte energetica sia stata mandata definitivamente in soffitta. Poiché l'energia non è mai abbastanza, la disponibilità di nuove risorse energetiche non ha mai determinato sostituzioni integrali nei sistemi energetici, bensì solo variazioni incrementali delle prospettive umane. Poiché ogni livello di qualità della vita sottende un ben determinato tenore energetico, ogni miglioramento sostanziale in termini di agiatezza della vita è sempre stato subordinato alla disponibilità di una fonte energetica di maggior pregio. Legno, carbone, petrolio e gas naturale sono l'emblema di organizzazioni sociali a bassa intensità energetica, di sistemi industriali semplici e prevalentemente orientati alla produzione, di insediamenti energetici dinamici e flessibili, di economie complesse, efficienti e, possibilmente, pulite. Si tratta di considerazioni che emergeranno in tutta chiarezza al termine del presente capitolo.

2.2 IL CARBONE

Il carbone è un minerale originato dal processo di carbonificazione (distillazione in assenza d'aria) di materiale vegetale, soprattutto legno, che si è accumulato in ambiente anaerobico e che è stato sepolto da una coltre sedimentaria.

La sua formazione è avvenuta a partire da resti vegetali che sono stati compressi, induriti, alterati chimicamente e trasformati da calore e pressione in tempi geologici. Si suppone che il carbone si sia formato a partire da piante cresciute in ecosistemi paludosi. Quando queste piante morirono, la loro i loro resti si depositarono in ambienti acquatici anaerobici, nei quali il basso livello di ossigeno non favorì il decadimento, l'ossidazione, la decomposizione ed il rilascio di biossido di carbonio. La nascita e la morte di generazioni successive di piante formarono spessi depositi di materia organica non ossidata, in seguito ricoperti da sedimenti e compattati in depositi carbonacei come torba, bitume o antracite. Indizi sul tipo di piante che hanno originato un deposito possono essere rintracciati nelle rocce scistose o nell'arenaria che lo ricopre o, con tecniche particolari, nel carbone stesso. L'era geologica durante la quale si formò la maggior parte del carbone fu il Carbonifero (fra i 280 e i 345 milioni di anni fa).

Nell'analisi dei diversi tipi di carbone vengono determinati l'umidità, le materie volatili, il tenore delle ceneri, il carbonio fisso e lo zolfo. Alcuni di questi parametri danno origine a diverse classificazioni.

Secondo la classificazione geologica, il carbone può essere suddiviso in:

- **torba:** carbone relativamente recente formatosi in seguito alla decomposizione lenta di vegetali, generalmente palustri, in presenza di acqua e di organismi anaerobici.
- **lignite:** carbone di formazione relativamente recente, proveniente da piante arboree. Presenta tracce visibili delle materie prime vegetali. A contatto con l'aria tende facilmente a polverizzarsi e a liberare materie volatili. E' difficilmente immagazzinabile e trasportabile, perché presenta forti rischi di combustione.

- **litantrace sub-bituminoso:** è un carbone fossile, di aspetto nero e legnoso, che si polverizza abbastanza lentamente a contatto con l'aria. La sua combustione sviluppa una grande quantità di fumo. Viene impiegato principalmente per la produzione di vapore nelle centrali.
- **litantrace bituminoso:** è il carbone per antonomasia, quello più comunemente utilizzato nel commercio internazionale per la produzione di energia elettrica. Produce fumo nella combustione, si decompone facilmente se esposto all'aria.
- **antracite:** carbone di rango più elevato, caratterizzato da una percentuale di materie volatili inferiore al 10% e da un'elevata percentuale di carbonio. L'antracite ha un aspetto lucido metallico e brucia lentamente senza fumo.

Due semplici classificazioni sono date dalla maturità diagenetica e dalla percentuale di sostanze volatili contenute nel minerale. La prima classificazione prende in considerazione la percentuale di acqua ancora presente, definendo tre classi, che in ordine crescente di pregio sono:

- torba: più del 60% di acqua;
- lignite: 20-60% di acqua;
- carbone vero e proprio: meno del 20%.

Secondo la percentuale di sostanze volatili, si distingue invece tra:

- carbone a fiamma lunga: elevata percentuale;
- carbone a fiamma corta: più del 16%;
- carbone sub antracitico: 16-8%;
- antracite: meno dell'8%.

L'assenza di acqua (umidità) è una caratteristica positiva, mentre la minore o maggiore quantità di sostanze volatili determina solo diversi usi del carbone. L'antracite non è usata nella produzione di energia elettrica per il suo alto costo e la sua difficile reperibilità. Infatti i giacimenti antracitici sono relativamente pochi e la loro formazione è legata ad eccezionali eventi tettonici, che

ne hanno deformato il deposito e reso costoso lo sfruttamento. Antracite e lignite sono escluse dall'uso metallurgico, non essendo fisicamente idonee.

La composizione chimica elementare del carbone varia con l'età, arricchendosi negli anni in carbonio e perdendo ossigeno. In tabella 2.1 sono riportate le composizioni dei singoli tipi di carbone.

Sostanza	% C	% H	% O	% N	% S	% ceneri
Legno	50 – 54	6 – 6.5	43.5 – 44	0.3 – 0.5	0	0.5 – 1.2
Torba	50 – 60	5.5 – 6.5	30 – 48	0.8 – 3	0.1 – 0.2	3 – 25
Lignite	60 – 75	5 – 6	20 – 45	0.7 – 2	1 – 12	3 – 8
Litantrace	75 – 90	4.5 – 5.5	5 – 15	0.7 – 2	0.5 – 4	0.5 – 4
Antracite	92 – 95	2 – 2.5	3	0.5 – 1	0.5 – 2	0.5 – 2

Tabella 2.1 – composizione elementare per tipologia di carbone

Il potere calorifico aumenta da torba ad antracite, mentre il rapporto H/C è sempre più piccolo, come ben evidente dalla tabella 2.2.

Sostanza	Rapporto H/C	P.C. [kcal/kg]
Legno	1.55	4000 – 4300
Torba	1.30	4500 – 5000
Lignite	0,07	5300 – 6000
Litantrace	0,05	7600 – 9000
Antracite	0.29	8300 - 9000

Tabella 2.2 – Poteri calorici dei vari tipi di carbone

2.2.1 Impatto ambientale ed impieghi

La combustione del carbone, come quella di ogni altro composto del carbonio, produce anidride carbonica ed anidride solforosa in quantità variabile in funzione del luogo dal quale è stato estratto. L'anidride solforosa reagisce con l'acqua, formando acido solforoso. Se l'anidride solforosa

viene rilasciata nell'atmosfera, reagisce con il vapore acqueo ed eventualmente torna sulla terra in forma di pioggia acida.

Il carbone contiene anche tracce di altri elementi, compresi l'arsenico e il mercurio, che sono pericolosi se rilasciati in ambiente.

Nel carbone sono anche presenti tracce di uranio e di altri isotopi radioattivi naturali, che rilasciati nell'ambiente possono comportare una contaminazione radioattiva. Sebbene queste sostanze siano presenti solo in tracce, bruciando grandi volumi di carbone ne vengono rilasciate quantità significative. Una centrale a carbone, durante il suo funzionamento, può emettere nell'aria anche più radioattività di quella che emette una centrale nucleare di pari potenza.

Oltre allo zolfo, qualunque tipo di carbone minerale, per quanto vagliato e polverizzato, contiene sempre metalli pesanti (per esempio, nichel, cadmio, piombo, mercurio, cromo e arsenico) ed alogeni (in particolare fluoro, cloro e loro composti). L'acido solforico e gli altri acidi forti (per esempio cloridrico, fluoridrico e nitrico) non sono gli unici prodotti indesiderati della combustione. È, infatti, ben noto che un qualunque processo di combustione produce anche ossidi di azoto (NO_x) e monossido di carbonio (CO). Quest'ultimo, in particolare, è un gas altamente tossico e nocivo: se respirato anche in piccole dosi, si fissa rapidamente all'emoglobina del sangue, formando la carbossiemoglobina e causando situazioni di crisi nell'ossigenazione delle cellule. Basta, infatti, una concentrazione di CO in aria pari solo allo 0,7%, per impegnare circa la metà dell'emoglobina del sangue. L'azione tossica si manifesta con cefalea e vomito e porta rapidamente a uno stato di coma fino al blocco della respirazione, con collasso vascolare.

La presenza di cloro nel carbone, inoltre, comporta la formazione e l'emissione nell'ambiente circostante di diossine che risultano nocive per l'uomo anche in concentrazioni di qualche ng/Nm³. Occorre, poi, considerare le nanopolveri o nanoparticelle, che danno origine alle nanopatologie e sono ben più sottili e nocive del più noto PM₁₀ o particolato fine (già responsabile di malattie cardiogene quali infarto, scompenso cardiaco, cancro polmonare, ictus). Queste microscopiche particelle di materiale inorganico, penetrando nell'organismo umano, possono arrivare direttamente

nel sangue entro 60 minuti dalla loro inalazione; così stimolano una forte reazione di autodifesa ad opera degli anticorpi macrofagi. Se il macrofago persiste nell'attacco, le nanopolveri possono generare un'infezione nel sistema immunitario che già può dare origine a tumori; inoltre, può anche accadere che le nanoparticelle riescano ad oltrepassare le membrane dei globuli rossi arrivando a provocare alterazione genetiche che possono degenerare in forme tumorali.

La combustione diretta del carbone è oggi solo una delle possibili forme di utilizzo di tale fonte fossile. La necessità di utilizzare tale fonte in maniera ecocompatibile, ha portato allo sviluppo di tecniche alternative che vanno sotto il nome di CLEAN COAL TECHNOLOGIES (CCT) e sulle quali sono in corso diversi programmi di ricerca internazionali.

Tra le più importanti tecnologie pulite per l'utilizzo del carbone sicuramente rientrano le seguenti:

- combustione a letto fluido (fluidised bed combustion, FBC),
- gassificazione del carbone (integrated gasification combined cycle, IGCC)
- polverizzazione del carbone - PCF
- combustione a letto fluido pressurizzato - PFBC
- polverizzazione pressurizzata del carbone - PPCC
- gassificazione del carbone "fuel cell systems" – IGFC

Le attuali tecnologie consentono di impiegare il carbone in maniera compatibile con l'ambiente ma il ricorso a nuovi impianti, nel panorama italiano, appare molto limitato per le forti opposizioni locali, in qualche caso poco motivate, come dimostra l'esperienza di questi ultimi anni.

Grazie infatti alle moderne tecnologie di abbattimento degli inquinanti, il carbone si è riaffermato come una fonte fossile con processi di conversione in energia a basso impatto ambientale.

Desolforatori, denitrificatori, lavaggio a umido, filtri per la captazione elettrostatica delle ceneri nei camini, sono metodi che portano le emissioni da carbone ad eguagliare quelle di metano ed olio combustibile.

Gli investimenti hanno consentito una significativa riduzione di tutte le emissioni inquinanti, conseguendo eccellenti risultati:

- 80% in meno di anidride solforosa SO₂
- 75% in meno di emissioni di polveri
- 60% in meno di ossidi di azoto NO_x
- recupero del 100% delle ceneri e dei gessi

Oggi in particolare si interviene su due fronti:

- abbattimento delle emissioni inquinanti, con sistemi di trattamento dei fumi sempre più sofisticati, quali i desolforatori, i denitrificatori, i depolverizzatori;
- prevenzione della loro formazione, per abbattere all'origine la produzione di emissioni inquinanti con tecniche e processi innovativi che migliorano le efficienze energetiche.

Questo processo innovativo ha portato la produzione di energia elettrica da carbone in Italia a standard di eccellenza ambientale, con un rendimento del 43% rispetto al 39% della media Europea. Gli ultimi studi dell'Agenzia Internazionale dell'Energia prevedono nel 2020 un rendimento medio europeo del 42%: si può dire che le centrali italiane abbiano raggiunto questo obiettivo con ben 20 anni di anticipo.

2.2.2 Produzione, consumo e riserve

Dalle miniere di tutto il mondo, nel 2006 sono stati estratti 6.195 milioni di tonnellate di carbone equivalenti in termini energetici a circa 3.079 Mtep.

I primi 5 produttori al mondo nel 2006 sono stati Cina, USA, India, Australia e Russia, la cui produzione ammontava alla fine dell'anno in esame al 76,8% della produzione mondiale.

Dati più dettagliati sono disponibili in tabella 2.3.

	Milioni di tonnellate	Mtep	% su totale mondo
Cina	2380	1212,3	39,4%
USA	1054	595,1	19,3%
India	447	209,7	6,8%
Australia	374	203,1	6,6%
Russia	309	144,5	4,7%
TOTALE	4.564	2364,7	76,8%
TOTALE MONDO	6195,1	3079,7	100,0%

Tabella 2.3 – Produzione di carbone nel 2006
(Elaborazione su dati British Petroleum)

Nel mondo nel 2006 sono stati consumati da fonte carbonifera 3.090 Mtep. I primi 5 consumatori al mondo sono stati Cina, USA, India, Giappone e Russia, che insieme hanno totalizzato il 72% del consumo mondiale di energia primaria assolto mediante carbone, come evidente in tabella 2.4.

	Mtep	% su totale mondo
Cina	1191,3	38,6%
USA	567,3	18,4%
India	237,7	7,7%
Giappone	119,1	3,9%
Russia	112,5	3,6%
TOTALE	2227,9	72,1%
TOTALE MONDO	3090,1	100,0%

Tabella 2.4 – Consumi di carbone nel 2006
(Elaborazione su dati British Petroleum)

Si noti, infine, confrontando i dati nelle tabelle 2.3 e 2.4, che sostanzialmente consumi e produzione mondiale coincidono a meno di una piccola differenza che dipende dalle scelte strategiche in tema di variazione delle scorte.

A fine 2006, le riserve erano stimate in 478.771 milioni di tonnellate di carbone antracitico e bituminoso, equivalenti in termini energetici a 319 Gtep, e in 430.293 milioni di tonnellate di carbone sub-bituminoso e lignitico, equivalenti in termini energetici a 143 Gtep. I primi Paesi al mondo per entità di riserve sono attualmente USA, Russia, India, Cina e Australia, che insieme rappresentano il 75% delle riserve mondiali stimate, come evidente in tabella 2.5.

	Antracite e bituminose		Sub-bituminoso e lignite		TOTALE	% su totale mondo
	Milioni tonnellate	Gtep	milioni tonnellate	Gtep	Gtep	
USA	111338	74,2	135305	45,1	119,3	25,8%
Russia	49088	32,7	107922	36,0	68,7	14,9%
India	90085	60,1	2360	0,8	60,8	13,2%
Cina	62200	41,5	52300	17,4	58,9	12,7%
Australia	38600	25,7	39900	13,3	39,0	8,4%
TOTALE	351.311	234,2	337.787	112,6	346,8	75,0%
TOTALE MONDO	478771	319	430293	143	463	100%

Tabella 2.5 – Riserve certe di carbone alla fine del 2006

(Elaborazione su dati British Petroleum)

2.3 IL PETROLIO

Il petrolio deriva da depositi di carbonio ed idrogeno esposti ad elevate pressioni e ad elevato calore. Sia la fase liquida oleosa (petrolio) che la fase gassosa (gas naturali) tendono a migrare attraverso le rocce porose finché incontrano strati impermeabili del terreno dove tendono a raccogliersi. Dopo il processo di estrazione, il petrolio greggio viene raffinato attraverso la distillazione. Il prodotto finale include cherosene, benzene, benzina, paraffina, asfalto, bitumi, ecc...

Propriamente parlando, il petrolio consiste per la maggior parte di idrocarburi alifatici sia lineari che ramificati e di idrocarburi aromatici (mono-, bi- e poli- ciclici) composti quasi esclusivamente da idrogeno e carbonio. Sono tuttavia presenti quantità di composti solforati (solfuri e disolfuri), azotati (chinoline e piridine) e ossigenati (acidi grassi, acidi naftenici e fenoli) anche se

la loro percentuale, complessivamente, difficilmente supera il 7 %. Nel petrolio si trovano anche metalli come Ni, V, Co, Cr, Cd, Pb, As, Hg, ecc.

Metano, etano, propano e butano (i quattro idrocarburi più leggeri) sono gas ed hanno una temperatura di ebollizione rispettivamente di -107°C , -67°C , -43°C , e -18°C .

Le catene molecolari con 5,7 atomi di carbonio sono nafte leggere che evaporano facilmente. Vengono usate come solventi, fluidi per pulizia a secco, e altri prodotti ad asciugatura rapida.

Le catene con 6,12 atomi di carbonio sono miscelate insieme e usate per la benzina.

Il cherosene è composto da catene con 10,15 atomi di carbonio, mentre il gasolio (per autotrazione e riscaldamento) è costituito da catene con 10,20 atomi di carbonio.

Gli olii lubrificanti e grassi semi solidi (come la vaselina) sono composti da 16,20 atomi di carbonio.

Le catene più pesanti sono relative ad idrocarburi allo stato solido (come paraffina, catrame e bitume per asfalto).

Di seguito si riportano gli intervalli di temperature di ebollizione delle frazioni di distillazione del petrolio a pressione atmosferica in gradi Celsius:

- etere di petrolio: 40 - 70 (usato come solvente)
- benzina leggera: 60 - 100 (combustibile per automobili)
- benzina pesante: 100 - 150 (combustibile per automobili)
- cherosene leggero: 120 - 150 (solvente casalingo e carburante)
- cherosene: 150 - 300 (carburante per motori jet)
- gasolio: 250 - 350 (carburante per motori Diesel / riscaldamento)
- olio lubrificante: > 300 (olio per motori)

Le frazioni rimanenti sono relative a catrame e asfalto, oltre a piccole frazioni di idrocarburi residui.

2.3.1 Impatto ambientale ed impieghi

L'impatto ambientale imputabile al petrolio ha senza dubbio molteplici aspetti. Primo fra tutti è quello legato ai processi di estrazione, trasporto e raffinazione del greggio. In secondo luogo è da considerare l'emissione di sostanze inquinanti provenienti dalla combustione di tutti i derivati del petrolio.

La presenza dell'industria petrolifera ha significativi impatti sociali e ambientali, da incidenti e da attività di routine come l'esplorazione sismica, perforazioni e scarti inquinanti. L'estrazione petrolifera è costosa e spesso danneggia l'ambiente. La ricerca e l'estrazione di petrolio offshore disturbano l'ambiente marino circostante. L'estrazione può essere preceduta dal dragaggio che danneggia il fondo marino e le alghe, fondamentali nella catena alimentare marina. Il greggio e il petrolio raffinato che fuoriescono da navi petroliere incidentate, hanno danneggiato fragili ecosistemi in Alaska, nelle Isole Galapagos, in Spagna e in molti altri posti.

Infine, la combustione, su tutto il pianeta, di enormi quantità di petrolio (centrali elettriche, mezzi di trasporto) risulta essere tra i maggiori responsabili dell'incremento riscontrato delle percentuali di anidride carbonica nell'atmosfera, con fortissima incidenza sul problema dell'effetto serra.

Il petrolio è massicciamente impiegato nel settore dei trasporti dove è praticamente insostituibile. Nei paesi dell'OCSE, per esempio, più del 97 % dell'energia utilizzata nel settore dei trasporti è di origine petrolifera.

D'altra parte, il petrolio è anche un importante prodotto per l'industria chimica che raggruppa il 64% degli utilizzi non energetici.

2.3.2 Produzione, consumi e riserve

Il petrolio estratto nel 2006 a livello mondiale è stato pari, in termini energetici, a circa 3.914 Mtep. I primi cinque produttori al mondo nello stesso anno sono stati Arabia Saudita, Russia, USA, Iran e Cina, con una percentuale pari al 43,4% della produzione globale.

Dati più dettagliati sono disponibili in tabella 2.6.

	Mtep	% su totale mondo
Arabia Saudita	514,6	13,1%
Russia	480,5	12,3%
USA	311,8	8,0%
Iran	209,8	5,4%
Cina	183,7	4,7%
TOTALE	1700,4	43,4%
TOTALE MONDO	3914,1	100,0%

Tabella 2.6 – Produzione di petrolio nel 2006
(Elaborazione su dati British Petroleum)

Nel mondo nel 2006 sono stati consumati da fonte petrolifera circa 3.890 Mtep. I primi cinque consumatori al mondo sono stati USA, Cina, Giappone, Russia e Germania, che insieme hanno totalizzato il 45,4% del consumo mondiale di energia primaria assolto mediante petrolio, come evidente in tabella 2.7.

	Mtep	% su totale mondo
USA	938,8	24,0%
Cina	349,8	8,9%
Giappone	235,0	6,0%
Russia	128,5	3,3%
Germania	123,5	3,2%
TOTALE	1775,6	45,4%
TOTALE MONDO	3889,8	100,0%

Tabella 2.7 – Consumi di petrolio nel 2006
(Elaborazione su dati British Petroleum)

Si noti, infine, confrontando i dati nelle tabelle 2.6 e 2.7, che sostanzialmente consumi e produzione mondiale coincidono, così come per il carbone, a meno di una piccola differenza che dipende dalle scelte strategiche in tema di variazione delle scorte.

A fine 2006, le riserve erano stimate in 1.208.200 milioni di barili di petrolio, equivalenti in termini energetici a 165 Gtep, di cui il 59% circa in mano a Arabia Saudita, Iran, Iraq, Kuwait e Emirati Arabi . Maggiori dettagli sono disponibili in tabella 2.8.

	Milioni di barili	Gtep	% su totale mondo
Arabia Saudita	264.251	36,2	21,9%
Iran	137.490	18,8	11,4%
Iraq	115.000	15,8	9,5%
Kuwait	101.500	13,9	8,4%
Emirati Arabi Uniti	97.800	13,4	8,1%
TOTALE	716.041	98,1	59,3%
TOTALE MONDO	1.208.200	165,5	100,0%

Tabella 2.8 – Riserve certe di petrolio alla fine del 2006

(Elaborazione su dati British Petroleum)

2.4 IL GAS NATURALE

Il gas naturale è un combustibile fossile, come il petrolio e il carbone. E' costituito da una miscela di idrocarburi, in massima parte metano, e da altre sostanze gassose come anidride carbonica, azoto, idrogeno solforato e, in qualche caso, elio. Le miscele che contengono soprattutto metano si dicono secche, mentre quando sono presenti anche idrocarburi come il propano e il butano si parla di miscele umide.

Prima di essere avviato all'utilizzo, il gas naturale viene trattato in modo da eliminare l'anidride carbonica e azoto, che lo rendono poco infiammabile, e, quindi, l'idrogeno solforato, gas tossico e corrosivo. Ciò che resta è prevalentemente metano. Il metano è l'idrocarburo gassoso più semplice e con molecola più piccola, formata da un atomo di carbonio e quattro di idrogeno (CH₄).

E' più leggero dell'aria (alla temperatura di 15 gradi centigradi e alla pressione di 1013,25 millibar, ha un peso specifico di 0,678 chilogrammi al metro cubo), non ha colore né odore e non è tossico.

2.4.1 Impatto ambientale ed impieghi

Dal punto di vista ambientale il metano presenta numerosi vantaggi: non contiene zolfo, quindi non produce anidride solforosa evitando così il fenomeno delle piogge acide; ha emissioni di anidride carbonica inferiori del 25% rispetto a quelle del petrolio e del 40% rispetto a quelle del carbone, essendo l'idrocarburo con il minor valore del rapporto C/H (rapporto in massa tra carbonio e idrogeno); non genera polveri e particolato perché è in forma gassosa; il suo trasporto avviene attraverso metanodotti sotterranei o navi metaniere e quindi ha uno scarso impatto ambientale.

Anche gli ossidi di azoto (NO_x) sono emessi in concentrazioni contenute: per quanto riguarda le turbine a gas ciò è garantito dagli elevati eccessi d'aria e quindi dalle basse temperature di combustione.

L'uso più comune del gas naturale è quello residenziale (cucine a gas, riscaldamento, acqua calda), in quanto non soltanto è il più pulito di tutti i combustibili fossili, ma anche quello più conveniente grazie a costi di gestione delle apparecchiature significativamente più bassi

Le industrie fanno ricorso al gas naturale non solo per scaldare o rinfrescare gli ambienti, ma anche per rendere più efficienti, economici ed ecologici i processi di produzione. Per esempio, il metano è impiegato nella tostatura del malto e del caffè, nella cottura di carni e prodotti da forno, nell'industria metallurgica, nella cottura di piastrelle, laterizi e ceramiche, nella produzione del vetro, nell'essiccazione della carta, ecc.

Il gas naturale conosce un sempre crescente successo anche come combustibile per gli autoveicoli. Oggi nel mondo circolano oltre un milione di vetture a gas naturale e le case automobilistiche investono sempre maggiori risorse nella progettazione di nuovi modelli con questo

tipo di alimentazione. Il gas naturale presenta un certo numero di vantaggi rispetto agli altri combustibili per autotrazione: brucia in modo pulito, costa meno, ha un indice di sicurezza provato, è una fonte di energia abbondante e sicura. In campo automobilistico, il metano è stoccato allo stato gassoso e ad alta pressione (anche fino a 20 MPa). Per assicurare il massimo beneficio di riduzione delle emissioni allo scarico, i veicoli a metano devono impiegare un catalizzatore sviluppato appositamente per abbattere gli idrocarburi residui della combustione del metano. Infatti, il metano si ossida con maggiore difficoltà rispetto agli altri idrocarburi ed è pertanto necessario adottare un catalizzatore caratterizzato da una quantità di metalli nobili (che fungono da catalizzatori) più elevata rispetto ai comuni standard. L'Italia è dotata della rete di rifornimento di metano per autotrazione più vasta di tutta l'Unione Europea.

In virtù di riconosciuti pregi ambientali, unitamente ad una certa competitività economica, negli ultimi anni il gas naturale si è trasformato nel combustibile fossile preferito per la produzione di elettricità. Negli anni Settanta e Ottanta la produzione energetica era orientata verso il carbone e le centrali nucleari, ma una combinazione di fattori economici, ambientali e tecnologici ha provocato uno spostamento verso il gas.

2.4.2 Produzione, consumi e riserve

Il gas prodotto nel 2006 a livello mondiale è stato pari a circa 2.865 di miliardi di m³, equivalente in termini energetici, a circa 2.586 Mtep. I primi cinque produttori al mondo nello stesso anno sono stati Russia, USA, Canada, Iran e Norvegia, con una percentuale pari al 53% della produzione globale. Dati più dettagliati sono riportati in tabella 2.9.

	Miliardi di m³	Mtep	% su totale mondo
Russia	612,1	550,9	21,3%
USA	524,1	479,3	18,5%
Canada	187,0	168,3	6,5%
Iran	105,0	94,5	3,7%
Norvegia	87,6	78,9	3,0%
TOTALE	1515,8	1371,8	53,0%
TOTALE MONDO	2865,3	2586,4	100,0%

Tabella 2.9 – Produzione di gas naturale nel 2006
(Elaborazione su dati British Petroleum)

A livello globale, nello stesso anno, sono stati consumati circa 1.219 Mtep. I primi cinque consumatori sono stati USA, Russia, Iran, Canada e Regno Unito, che insieme hanno totalizzato il 47,3% dei consumi mondiali di energia primaria assolto mediante gas naturale, come evidente in tabella 2.10.

	Mtep	% su totale mondo
USA	566,9	22,0%
Russia	388,9	15,1%
Iran	94,6	3,7%
Canada	87,0	3,4%
Regno Unito	81,7	3,2%
TOTALE	1219,0	47,3%
TOTALE MONDO	2574,9	100,0%

Tabella 2.10 – Consumi di gas naturale nel 2006
(Elaborazione su dati British Petroleum)

Si noti, infine, confrontando i dati nelle tabelle 2.9 e 2.10, che sostanzialmente consumi e produzione mondiale coincidono, così come per il carbone e per il petrolio, a meno di una piccola differenza che, ancora una volta, dipende dalle scelte strategiche in tema di variazione delle scorte.

A fine 2006, le riserve erano stimate in 181,5 miliardi di metri cubi, equivalenti in termini energetici a 156,4 Gtep, di cui il 63% circa in possesso di Russia, Iran, Qatar, Arabia Saudita e Emirati Arabi. Maggiori dettagli sono disponibili in tabella 2.11.

	Miliardi di m³	Gtep	% su totale mondo
Russia	47,7	41,1	26,3%
Iran	28,1	24,2	15,5%
Qatar	25,4	21,9	14,0%
Arabia Saudita	7,1	6,1	3,9%
Emirati Arabi Uniti	6,1	5,2	3,3%
TOTALE	114,3	98,5	63,0%
TOTALE MONDO	181,5	156,4	100,0%

Tabella 2.11 – Riserve certe di gas naturale alla fine del 2006
(Elaborazione su dati British Petroleum)

3. L'ENERGIA NUCLEARE

Per lungo tempo, l'atomo è stato ritenuto la più piccola parte di ogni elemento presente in natura; lo stesso nome, deriva dall'aggettivo (ατομος, ov) che significa indivisibile. In realtà, esso è costituito da un nucleo di protoni e neutroni immerso in una nube spaziale di elettroni. All'interno di un nucleo atomico, particelle nucleari e subnucleari sono tenute insieme da interazioni di fortissima entità. Le applicazioni da fonte nucleare nascono proprio dalla possibilità di impiegare utilmente le grandi energie che si liberano allorquando, in qualche misura, si interviene sui nuclei atomici.

Energia nucleare può essere liberata sia attraverso la fissione (ovvero dalla separazione di atomi pesanti in nuclei più leggeri) che attraverso la fusione (ovvero dall'unione di elementi leggeri in nuclei più pesanti). Delle due reazioni, ad oggi la fissione è l'unica che l'uomo riesce a riprodurre in forma controllata. In ogni caso, le reazioni nucleari generano sempre una quantità di energia impressionante: in generale, infatti, l'energia liberata in una reazione di fissione nucleare è circa un milione di volte maggiore rispetto a quella sprigionata, a parità di peso dei reagenti, durante una reazione chimica di combustione.

3.1 GLI ALBORI DELL'ENERGIA NUCLEARE

Alla base di tutto vi fu la scoperta del neutrone ad opera di Chadwick nel 1932. Fu allora che a Roma, con il gruppo di via Panisperna, Fermi pensò di usare i neutroni per bombardare nuclei ed ottenere reazioni nucleari immediate. Erano le 15 del 22 ottobre 1934: la prima rudimentale fissione nucleare della storia era stata realizzata bombardando uranio con neutroni rallentati per mezzo di paraffina. Il gruppo guidato da Fermi, però, non si accorse di ciò che era avvenuto ma ritenne invece di aver prodotto degli elementi transuranici. Solo alla fine di dicembre del 1938, esattamente

nella notte dal 17 al 18, due chimici nucleari tedeschi, Otto Hahn e il suo giovane assistente Fritz Strassmann, dimostrarono che, colpendo un nucleo di U^{235} con un neutrone, sono elevate le probabilità di innescare una reazione di fissione nucleare. E solo allora si comprese pienamente che la fissione è una reazione nucleare nella quale un nuclide con elevato numero atomico ($Z > 90$) assorbe un neutrone, scindendosi in due (o, più raramente, in tre) nuclei di massa intermedia, rilasciando altri neutroni e liberando enormi quantità di energia. Alla vigilia della Seconda Guerra Mondiale, in quasi tutto il mondo, ai fisici nucleari balenò l'idea che si potesse innescare una reazione a catena ove mai i neutroni ottenuti dalla scissione di un atomo fossero capaci di scindere altri nuclei nelle vicinanze.

Le domande più ricorrenti tra gli scienziati essenzialmente erano rivolte a capire quale fosse l'isotopo dell'uranio responsabile della fissione, quanto rapida potesse essere un'eventuale reazione a catena e se vi fosse modo di regolarla al fine di ottenere una fonte energetica controllabile. In breve si arrivò alla conclusione che l'isotopo fissile dell'uranio era l' U^{235} , che era possibile innescare una reazione a catena controllabile. Rapidamente si comprese che i neutroni generati in una reazione di fissione, a loro volta, possono venire assorbiti da altri nuclei di atomi vicini; se ciò accade per più di un neutrone, il numero di nuove fissioni è maggiore dell'unità e si innesca una reazione a catena ovvero il numero di reazioni aumenta esponenzialmente; se tale numero è uguale all'unità si ha che le reazioni nucleari si susseguono in maniera stabile; se tale numero è inferiore all'unità, la reazione di fissione si arresta.

Negli anni '40, poi, si capì che l' U^{238} , l'isotopo dell'uranio più abbondante in natura, non è fissile; in taluni casi, però, può accettare un neutrone, trasformandosi in plutonio, un elemento artificiale ugualmente fissile alla pari dell' U^{235} . Queste scoperte diedero nuovo impulso agli studi in materia cosicché rapidamente si arrivò alla pila atomica di Enrico Fermi e Leo Szilard che, finalmente, dimostrarono la fattibilità di impiegare la fissione nucleare per scopi energetici. Ma i tempi non erano ancora maturi perché la scoperta si indirizzasse verso scopi civili. Era ancora in

corso la Seconda Guerra mondiale e, così, gli sforzi successivi furono rivolti alla costruzione delle bombe atomiche che sarebbero state sganciate su Hiroshima e Nagasaki nell'agosto del '45.

Perché potesse avere inizio la storia del nucleare civile sarebbe dovuto passare ancora qualche anno. Infatti, le prime centrali nucleari risalgono agli anni '50.

3.2 LE CENTRALI NUCLEARI A FISSIONE

Gli impianti nucleari a fissione convertono in energia elettrica l'energia termica generata per fissione nucleare. Il luogo all'interno del quale è posto il combustibile nucleare è detto reattore nucleare e rappresenta il cuore dell'impianto.

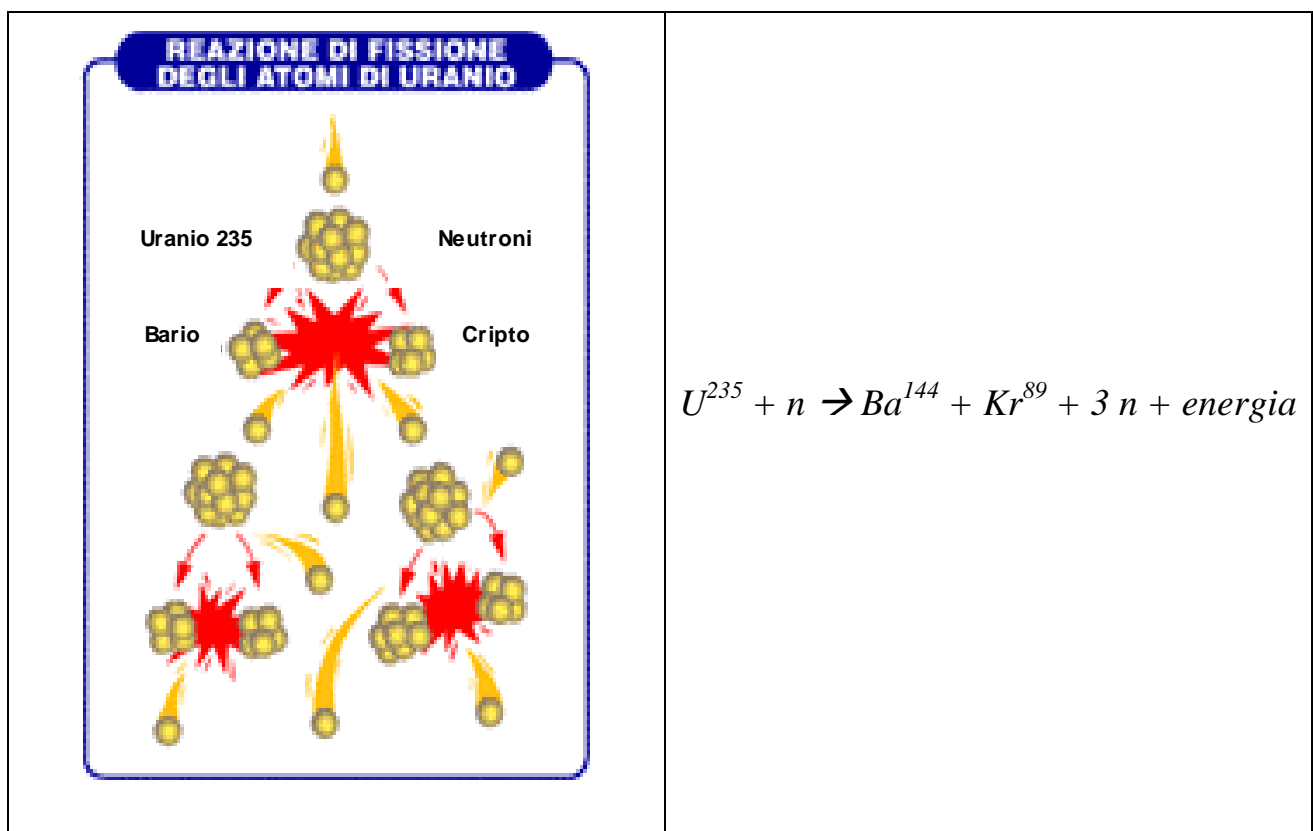


Figura 3.1

In un reattore nucleare, si definisce massa critica una situazione in cui concentrazione e disposizione di atomi con nuclei fissili sono tali da mantenere stabile la reazione di fissione. Detto R il rapporto tra neutroni assorbiti e numero di reazioni, in condizioni di massa critica deve essere $R=1$. Nei reattori nucleari il valore di R non deve mai eccedere l'unità, ad eccezione dei transitori, quando per aumentare la potenza del reattore si può arrivare a $R=1.01$; diversamente, nelle armi nucleari il valore di R deve essere il più alto possibile e in tal caso si può arrivare fino a 1,2.

Gli atomi fissili consumati nel reattore possono avere origine naturale o artificiale. L'elemento fissile per antonomasia è l' U^{235} che, se colpito da un neutrone, tipicamente si divide in Ba^{144} e Kr^{89} , rilasciando 3 neutroni ed un'immensa quantità di energia.

Ugualmente fissile è anche il plutonio, che, però, non esiste in natura (solo in alcune miniere di uranio ne sono state rinvenute piccole tracce). Il plutonio può essere generato partendo dall' U^{238} . Questi, infatti, se bombardato con neutroni, può accettarne uno, trasformandosi in un nuovo isotopo, l' U^{239} . Questo è molto instabile; dopo circa 23 minuti decade trasformandosi in nettunio, un altro elemento artificiale di numero atomico $N=93$ e massa atomica $A=239$. L'elemento N^{239} , a sua volta, decade ed in circa in due giorni si trasforma in plutonio, avente numero atomico $Z=94$ e massa atomica $A=239$.

Una centrale elettronucleare è in tutto e per tutto simile ad una centrale termoelettrica con l'unica differenza che il tradizionale generatore di calore (caldaia) della prima è stato sostituito da un reattore nucleare a fissione nella seconda. Dunque, mentre in una il calore impiegato per generare vapore deriva dalla combustione di un combustibile fossile, nell'altra proviene dalla fissione del combustibile nucleare.

Nei primi sviluppi dell'energia nucleare furono proposti molti tipi di reattore con una grande varietà di soluzioni sia per il sistema di raffreddamento nel nocciolo (acqua, acqua pesante, liquidi organici, metalli liquidi, sali fusi, gas) che per i materiali fissili da impiegare (U^{235} , U^{238} , Pu^{239} , Th^{232}). I reattori costruiti negli anni '50 e '60 rappresentano la prima generazione degli impianti nucleari civili con potenza dell'ordine di 10-100 MW.

Da questa gara evolutiva, gradualmente emersero gli impianti di seconda generazione ovvero i reattori degli anni '70, tipicamente raffreddati ad acqua (leggera). Esistono due tipi di reattori ad acqua o LWR (acronimo per *Liquid Water Reactor*): i reattori con acqua in ebollizione (i cosiddetti BWR, acronimo di *Bowling Water Reactor*). e quelli con acqua in pressione (i cosiddetti PWR, acronimo di *Pressurized Water Reactor*). Nei primi l'ebollizione dell'acqua avviene nel reattore ed il vapore generato giunge attraverso i condotti direttamente alle turbine; negli altri, invece, il fluido che arriva alle turbine proviene da un generatore di vapore a recupero che sfrutta il calore dell'acqua (in pressione) del circuito di raffreddamento del nocciolo. Gli impianti di seconda generazione furono costruiti fino alla fine agli anni '80 con potenze dell'ordine di 1.000 MW. Il tristemente famoso reattore RBMK esplosivo a Chernobyl nella notte del 26 aprile 1986 senza ombra di dubbio può essere considerato un impianto di seconda generazione.

A partire dagli anni '90, specialmente in Giappone e Corea del Sud, si sono diffusi i reattori di terza generazione. Si tratta ancora di reattori ad acqua, prevalentemente PWR, ma integrati con sistemi di sicurezza passiva (ovvero basati su leggi fisiche e, dunque, massimamente affidabili) che sono deputati a spegnere il reattore automaticamente in caso di anomalia. Gli impianti di terza generazione, pertanto, sono intrinsecamente più sicuri di quelli delle generazioni precedenti perché non richiedono l'intervento umano per lo spegnimento.

Gli impianti nucleari attualmente in funzione nel mondo sono circa 440. La maggioranza di questi sono PWR, ma in numero ben più limitato sono presenti anche impianti nei quali il fluido di raffreddamento è acqua pesante (cioè contenente deuterio), biossido di carbonio allo stato gassoso o sodio liquido.

Un PWR tipico impiega come refrigerante acqua alla pressione di 155 atmosfere (circa 15,5 MPa). Il nocciolo di un reattore ad acqua pressurizzata è formato da schiere di barre di combustibile rivestite di lega di zirconio; ciascuna barra è un piccolo cilindro contenente ossido di uranio debolmente arricchito. Una schiera tipica di 17x17 barre di combustibile costituisce quello che viene chiamato "elemento di combustibile". Il nocciolo, che tipicamente ha diametro ed altezza di

3,5 m ed è racchiuso all'interno di un recipiente in pressione, solitamente ospita 200 elementi di combustibile. All'interno del nocciolo il refrigerante entra a circa 290 °C ed esce a circa 325 °C. Con questi valori di temperatura, dunque, non deve meravigliare che il rendimento del ciclo vapore sottostante sia estremamente basso (ben difficilmente si arriva al 25%). Per controllare la potenza termica, nelle schiere di barre di combustibile sono inserite barre di controllo: Costituite di materiale che modera la reazione di fissione assorbendo i neutroni termici emessi durante il processo, le barre di controllo consentono di regolare la velocità di avanzamento della reazione nucleare: nel caso di una qualche anomalia di funzionamento o semplicemente per consentire le operazioni di sostituzione del materiale fissile, le barre di controllo vengono completamente abbassate nel nocciolo così da provocare il totale arresto della reazione e lo spegnimento del reattore.

L'intero reattore è solitamente racchiuso all'interno di un sarcofago di calcestruzzo armato. Tale struttura in primo luogo funge da schermo per le radiazioni; in secondo luogo, deve contenere le conseguenze di eventuali urti violenti e/o esplosioni. Nel 1979, nella centrale statunitense di Three Mile Island si arrivò alla fusione del nocciolo, con emissione di rilevanti quantità di gas radioattivi, in particolare, isotopi dello xenon e dello iodio. Pur tuttavia, la dose di radioattività assorbita dalla popolazione fu estremamente contenuta grazie alla presenza del sarcofago che limitò le fughe verso l'esterno. Se a Chernobyl il reattore esplose avesse avuto intorno una struttura di contenimento, probabilmente le conseguenze ambientali della catastrofe sarebbero state molto più limitate: a seguito dello scoppiamento del reattore, infatti, si sprigionò verso l'esterno una nube radioattiva che i venti portarono a spasso per l'Europa Settentrionale; la presenza di un sarcofago in calcestruzzo armato, invece, avrebbe consentito il confinamento all'interno di buona parte delle emissioni radioattive ed avrebbe limitato enormemente le conseguenze per la popolazione civile.

3.2.1 L'impatto ambientale dei reattori nucleari a fissione

Tutti i combustibili nucleari sono costituiti di uranio o suoi composti e derivati. L'uranio è l'elemento naturale più pesante in natura. L'uranio naturale, costituito per il 99,3% dall'isotopo 238, per il restante 0,7% dall'isotopo 235, per meno dello 0,01% dall'isotopo 234, si estrae dalle miniere. Ed è qui che nascono i primi problemi ambientali.

A causa della radioattività naturale del minerale, in miniera sono necessarie adeguate misure di sicurezza per tutelare la salute dei minatori. Il principale problema da cui cautelarsi è costituito dalla polvere che può essere ingerita e/o inalata; si devono inoltre considerare i rischi di fuoriuscite dal sottosuolo di radon, un gas radioattivo, che può diventare estremamente pericoloso in elevata concentrazione. Infatti, l'OMS (Organizzazione Mondiale della Sanità) considera il radon nocivo alla salute e lo IARC (Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro) lo classifica tra gli agenti cancerogeni per l'uomo.

Una volta estratto l'uranio minerale è necessario procedere alla purificazione per rimuovere i materiali indesiderati; la stessa operazione di purificazione può lasciare ingenti quantità di rifiuti radioattivi. D'altra parte, occorre anche considerare che l'uranio minerale purificato è poco impiegato nei reattori attualmente in esercizio. Nei reattori ad acqua leggera (la maggioranza), il combustibile nucleare è minerale arricchito in U^{235} fino al 3-5%. Purtroppo, però, anche il processo di concentrazione ed arricchimento genera ulteriore materiale radioattivo. Infatti, nell'uranio arricchito al 3-5% l' U^{235} presente è tratto da quantità di uranio minerale 4,3-7,1 volte maggiori; la differenza è tutto U^{238} in eccesso. Per esempio, per produrre 100 kg di uranio arricchito al 3% servono circa 429 kg di uranio minerale e si ottengono ben 329 kg di U^{238} da smaltire.

Di solito, i residui delle operazioni di purificazione e concentramento sono riposti, adeguatamente confinati, presso il luogo di estrazione dell'uranio. In passato, però, le cose non sempre sono andate come dovuto: durante gli anni di guerra fredda tra Usa ed URSS, spesso ingenti quantità di rifiuti radioattivi sono stati abbandonati senza adottare alcuna misura di confinamento e,

dunque, a diretto contatto con l'ambiente circostante. A causa di questa leggerezza, si stima che le superficie contaminate ammontino a 400 km² negli Usa ed a 600 km² nei territori dell'ex URSS.

Pur tuttavia, il vero problema ambientale è costituito dalle scorie di fissione, dati gli effetti biologici delle radiazioni: nel corpo umano, infatti, addirittura possono provocare danni genetici trasferibili alle successive generazioni, oltre a neoplasie ed altri danni in funzione della dose assorbita. In generale, una tonnellata di uranio arricchito al 3% genera circa 29 kg di prodotti di fissione (iodio, tecnezio, neodimio, zirconio, cesio, ecc.), 10 kg di plutonio (prevalentemente il Pu²³⁹) e 1 kg di attinidi (americio, curio, nettunio). Se paragonati con le 3 tonnellate di U²³⁸ che occorre smaltire solo per l'arricchimento di 1 t di uranio al 3%, i 40 kg di scorie radioattive in termini di volume sono ben poca cosa; ma purtroppo, il diverso livello di pericolosità praticamente inverte i rapporti in gioco.

I rifiuti nucleari possono essere a bassa, media o alta radioattività.

I rifiuti **a bassa radioattività** sono quelli che decadono nell'arco di alcuni mesi: per lo più si tratta di indumenti, guanti, soprascarpe e filtri contaminati provenienti non solo da centrali nucleari, ma anche da istituti di ricerca, laboratori di medicina nucleare, centri radioterapici.

I rifiuti **a media radioattività** includono resine, fanghi contaminati e rottami metallici provenienti dai medesimi luoghi, nonché buona parte dei prodotti di fissione: in generale, si tratta di residui radioattivi con tempi di decadimento dell'ordine di alcune centinaia di anni. Diversamente, i rifiuti **ad alta radioattività** decadono in tempi ben più lunghi, dell'ordine delle decine o centinaia di migliaia di anni: essenzialmente comprendono l'uranio e, soprattutto, i composti transuranici generati dalle reazioni nucleari. In generale, il combustibile esausto è composto da tre tipi di materiali.

I **prodotti di fissione** individuano una serie di elementi piuttosto leggeri e con radioattività estremamente elevata nei primi anni di vita. Dopo circa 10 anni, l'attività è dovuta soprattutto al Cs¹³⁷ ed allo Sr⁹⁰, entrambi solubili in acqua e, quindi, da isolare in maniera molto efficiente. Il tempo di dimezzamento (ovvero il tempo occorrente perché la metà degli atomi presi in esame

decada in un altro elemento) è per entrambi prossimo ai 30 anni; dopo circa tre secoli la radioattività si è praticamente annullata.

L'**uranio** costituisce il grosso del combustibile nucleare esausto. Si tratta di uranio non scisso e notevolmente impoverito che ha praticamente perso quasi tutta la frazione di arricchimento in U^{235} e presenta composizione simile all'uranio minerale. E' blandamente radioattivo e, una volta separato dal resto del combustibile esausto, potrebbe essere immagazzinato in sicurezza e, magari, anche impiegato in altre applicazioni.

Infine, vi è la **componente transuranica**. Questa parte del combustibile è in buona misura costituita da isotopi del plutonio, prevalentemente Pu^{239} , ma sono anche presenti piccole quantità di altri elementi quali americio, nettunio e curio.

Pur presenti nel combustibile esausto in misura inferiore all'1%, gli elementi transuranici rappresentano la fonte principale dei problemi dovuti alle scorie radioattive.

Il decadimento degli elementi transuranici avviene su una scala di tempo ben maggiore di quella umana. Basti pensare che il tempo di dimezzamento del Pu^{239} , il più abbondante nelle scorie, è pari a circa 24.200 anni. Pur tuttavia, non è tanto l'orizzonte temporale di decadimento dei transuranici che desta timore (in natura, infatti, esistono l' U^{235} e l' U^{238} che sono caratterizzati da tempi di dimezzamento rispettivamente pari a 700×10^6 e $4,5 \times 10^9$ anni), quanto piuttosto che i transuranici siano elementi creati dall'uomo; se il processo evolutivo seguito dalla natura, che ha dimostrato di essere maestra nello sviluppo di cicli vitali sostenibili, ha fatto a meno dei transuranici, non può essere ignorato il rischio che, in caso di eccessiva diffusione, questi elementi possano essere in contrasto con i processi biologici della Terra.

D'altra parte, però, sebbene in tracce minime, in alcune miniere di uranio è stato riscontrato del plutonio: verosimilmente, in passato uranio e plutonio coesistevano in natura, ma questi non è quasi giunti ai nostri giorni a causa di un decadimento ben più rapido.

In ogni caso, preoccupa soprattutto che questi elementi, creati dall'uomo moderno e destinati a sopravvivergli per parecchi millenni, siano estremamente tossici. Il plutonio, per

esempio, è caratterizzato da un'estrema tossicità: le particelle alfa che emette non penetrano la pelle, ma possono danneggiare seriamente gli organi interni in caso di inalazione o ingestione. Particolarmente a rischio sono lo scheletro, sulla cui superficie il plutonio è assorbito, ed il fegato, dove viene raccolto e concentrato. Particelle finissime di plutonio (dell'ordine dei microgrammi) causano il cancro ai polmoni per inalazione.

Naturalmente, non si può ignorare che l'uomo sta continuando a produrre elementi molto pericolosi, destinati a mantenere nel tempo un elevato grado di tossicità, dei quali la natura ha fatto tranquillamente a meno senza che questo impedisse l'evoluzione della vita. Certamente con il progresso e nel tempo, certi timori potrebbero rivelarsi infondati o eccessivi, „ma per il momento permane, pesante, il dubbio di avviarsi a consegnare alle generazioni future un grosso fardello.

Comunque, è indubbio che oggi i transuranici esistono ed è gioco forza necessario imparare a convivervi.

Il problema dello smaltimento delle scorie transuraniche è concreto e deve essere risolto prima ancora di discutere se valga la pena continuare a produrne altre. Infatti, se anche per assurdo il mondo decidesse di chiudere tutte le centrali nucleari, comunque, persisterebbe il problema delle scorie fin qui generate. La più grande difficoltà di una soluzione definitiva è legata alla necessità di dover perdurare nel corso dei millenni. In assenza di altre opzioni (di là da venire), per evitare contaminazione da scorie radioattive, occorre attrezzare luoghi atti ad ospitarle finché non sia trascorso un tempo sufficiente a portarli a livelli di radioattività tollerabili.

Attualmente, le scorie radioattive sono lasciate decantare in apposite piscine fino ad una decina di anni; la permanenza in acqua, infatti, già nel giro di pochi anni consente di ridurre in modo molto consistente la radioattività di parecchie specie. Quindi, previa separazione delle scorie innocue, si procede alla successiva immobilizzazione dei residui ancora radioattivi: si procede cioè a bloccare le scorie nel vetro o in speciali ceramiche insolubili in acqua al fine di impedire che possano contaminare acqua o altri liquidi con cui, ipoteticamente, potrebbero entrare in contatto. Successivamente, le scorie inertizzate sono poste all'interno di speciali contenitori specificamente

progettati per resistere alla corrosione nel medio-lungo periodo. Solo a questo punto le scorie, compattate e protette, sono inviate in apposite strutture per l'immagazzinamento di medio-lungo termine.

Purtroppo, però, nel caso dei transuranici si tratta di tempi così lunghi che nessuna costruzione umana può arrivare a vedere senza continue e massicce ristrutturazioni; solo una struttura geologica può resistere per decine di migliaia di anni (ed oltre) in sicurezza.

3.2.2 La necessità di depositi geologici

Fino ad oggi, tutte le scorie sono state immagazzinate in superficie in depositi temporanei (spesso presso le stesse centrali nucleari). Fortunatamente, infatti, le scorie nucleari occupano poco spazio: una centrale nucleare da 1.000 MW genera qualche decina di t/anno di elementi transuranici che, in termini di spazio, corrispondono a qualche m³/anno di volume. Dunque, è vero che occorre ricercare siti geologici particolarmente stabili, ma è anche vero che al loro interno è necessario stivare quantità di rifiuti nucleari relativamente modeste.

Che caratteristiche dovrebbe avere un deposito geologico? In linea di massima, deve trattarsi di una struttura sotterranea geologicamente stabile: in primo luogo, infatti, occorre cautelarsi dal rischio connesso al manifestarsi di eventi sismici, calamità naturali, eventi distruttivi quali cadute di aerei, bombardamenti, esplosioni di qualunque genere e, quant'altro, sia umanamente prevedibile possa accadere con conseguenze catastrofiche di qui a qualche migliaio di anni; in secondo luogo, deve essere opportunamente isolato da tutto quanto potrebbe essere contaminato e diffuso in ambiente: per esempio, un buon deposito geologico deve essere sufficientemente lontano da falde acquifere che potrebbero facilmente diffondere nella catena biologica enormi quantità di radioattiva.

Nel mondo, attualmente non esiste alcun deposito geologico. Però, ad Olkiluoto, in **Finlandia**, dal 2004, sono iniziati gli scavi per realizzarne uno. I lavori proseguiranno fino al 2020, quando le gallerie scavate nello zoccolo di granito che sorregge la penisola scandinava

accoglieranno le 5531 t di scorie che le quattro centrali nucleari finlandesi avranno prodotto fino ad allora. Il progetto prevede che, quando il deposito sarà saturo di rifiuti, verosimilmente entro il 2120, con 330.000 m³ di roccia mista a cemento saranno sigillate tutte le gallerie.

Entro il 2008 la galleria di accesso avrà raggiunto la profondità di 420 m, che individuano il primo livello della struttura: qui geologi ed ingegneri studieranno le caratteristiche meccaniche della roccia e metteranno alla prova diverse soluzioni tecniche per isolare e proteggere le scorie, costituite essenzialmente da U²³⁵, Pu²³⁹ ed attinidi minori.

Entro il 2010, gli scavi dovrebbero aver raggiunto il secondo livello della struttura, ad una profondità di 520 m. Qui sarà condotta un'altra serie di test.

Se sarà confermata l'idoneità del sito tra il 2010 ed il 2020 saranno portati a termine i lavori di realizzazione delle gallerie, che saranno scavate in uno strato di roccia cristallina di quasi due milioni di anni. Le gallerie si estenderanno in parte sotto la terraferma, in parte sotto il fondale del mar Baltico. Poiché il granito è permeabile all'acqua, quando il deposito sarà sigillato per la saturazione della capacità di stoccaggio, le pompe di drenaggio saranno spente e tutto il deposito sarà invaso dalle acque. Per tale motivo, i rifiuti alloggiati ad Olkiluoto saranno sigillati in contenitori cilindrici in rame, che essendo un metallo nobile, è il più adatto a resistere all'ossidazione ed alla corrosione.

Anche la Svezia e la Svizzera si apprestano a costruire un deposito geologico.

In **Svezia**, entro il 2011 dovrebbe essere fatta la scelta definitiva del sito, che molto probabilmente avrà ancora una struttura granitica.

In **Svizzera**, invece, l'interesse è tutto rivolto all'argilla opalina, uno strato omogeneo di roccia sedimentaria stabile, non soggetto a terremoti ed attività tettonica, che si estende sotto la regione del Weinland zurighese.

A differenza del granito, l'argilla opalina è impermeabile all'acqua; per l'incapsulamento dei rifiuti è così possibile utilizzare contenitori in acciaio inossidabile, risparmiando sulla spesa dei più costosi cilindri in rame che saranno utilizzati in Finlandia e Svezia.

3.2.3 L'opportunità di ridurre le scorie transuraniche

Pur non potendo eliminare il problema delle scorie radioattive, il mondo ha a disposizione un'altra strada: provare a contenerle puntando su un impiego più efficiente del combustibile. Per far ciò, però, occorre rimuovere alcuni preconcetti circa il libero utilizzo del plutonio.

Per via della sua facile fissione e per l'abbondante disponibilità, nelle moderne armi nucleari il Pu^{239} è un componente fissile fondamentale. La massa critica per una sfera di plutonio è di 16 chilogrammi, che può essere ridotta a 10 chilogrammi attraverso l'uso di una schermatura che le rifletta contro i neutroni da essa emessi. Una tale quantità corrisponde circa ad una sfera di 10 centimetri di diametro che per completa detonazione libera un'energia di 200 kton. Per comprendere di cosa stiamo parlando, si considera che la bomba atomica rilasciata su Nagasaki aveva una potenza compresa tra 10 e 30 kton. Da sempre legato a doppio filo con l'industria bellica, il plutonio è per questo stato visto con sospetto. Nel mondo occidentale non sono mancati tentativi di elevare barriere ideologiche all'utilizzo del plutonio in campo civile; in virtù di ciò, l'impiego del plutonio in campo civile è stato più o meno osteggiato. Nel 1977, per esempio, temendo che il plutonio potesse essere impiegato nella costruzione di bombe atomiche sporche, l'allora presidente degli Stati Uniti, Jimmy Carter, proibì il riprocessamento del combustibile nucleare impiegato in campo civile. Impedendo di recuperare il plutonio dal combustibile esausto, Carter pensava di tutelare gli Stati Uniti ed il mondo dal rischio di attentati terroristici. Le conseguenze di quella decisione si vedono ancora oggi: mentre dalle scorie militari sono stati estratti plutonio ed uranio (per l'impiego diretto e la produzione di altro plutonio), nelle scorie civili sono ancora presenti plutonio ed uranio. D'altra parte, le conseguenze di quella scelta sarebbero potute essere ancora più marcate: se Regno Unito, Francia, Russia e Giappone avessero deciso di adeguarsi agli Stati Uniti, probabilmente il riprocessamento del plutonio in campo civile sarebbe solo un ricordo.

Per capire cosa comporta il riprocessamento del plutonio occorre sviluppare alcune considerazioni circa il ciclo di produzione del combustibile nucleare.

Il combustibile nucleare può essere generato in cicli aperti o in cicli chiusi.

In un ciclo completamente aperto, il combustibile nucleare si produce unicamente dall'uranio minerale. Supponiamo, per esempio, di voler produrre una tonnellata di uranio arricchito al 3%. Nei 1000 kg di combustibile sono presenti 970 kg di U^{238} e 30 kg di U^{235} . Questi ultimi sono contenuti in 4.286 kg di minerale, nel quale sono anche presenti 4.256 kg di U^{238} , di cui solo 970 kg servono nel combustibile nucleare mentre gli altri vanno smaltiti.

In un ciclo chiuso, si riutilizza una parte del combustibile esausto. Riciclando l'uranio arricchito allo 0,9%, l'operazione di concentrazione al 3% di U^{235} necessita di “soli” 3.057 kg di uranio minerale. L'efficienza di impiego del minerale sale dallo 0,93% allo 0,99%, risparmiando ben 1.229 kg di uranio minerale, ma soprattutto si evita lo smaltimento di 8,6 kg di U^{235} e quasi 1.208 kg di U^{238} .

In un reattore ad acqua leggera, ipotizzando di procedere alla sostituzione del combustibile quando l'arricchimento è sceso allo 0,9%, da 1 t di uranio al 3% si ottengono:

- 29 kg di prodotti di fissione;
- 10 kg di plutonio (prevalentemente Pu^{239});
- 1 kg di attinidi;
- 8,6 kg di U^{235} ;
- 951,4 kg di U^{238} .

Dunque, il combustibile esausto contiene ben 10 kg di plutonio, prevalentemente nella forma dell'isotopo-239. Il Pu^{239} , alla pari dell' U^{235} , è fissile e, dunque, può essere impiegato per generare combustibile nucleare. In linea di principio, possiamo pensare che 1 t di combustibile al 3% di plutonio sia costituita da 30 kg di Pu^{239} e 970 kg di U^{238} . I 10 kg di plutonio presenti nel combustibile esausto di 1 t di uranio arricchito al 3% insieme a 323 kg di U^{238} , consentono di produrre circa 333 kg di combustibile al 3% di plutonio. Da dove è possibile prelevare, i 323 kg di U^{238} necessari? In un ciclo integrato estrazione del minerale/produzione di combustibile, non è assolutamente un problema: basta attingere dagli scarti dell'operazione di arricchimento dell'uranio

minerale fino al 3% di U^{235} . Dunque, mettendo in serie un reattore all'uranio ed uno al plutonio (di taglia opportunamente più piccola), è possibile alimentare il secondo esclusivamente riprocessando le scorie del primo.

Ipotizziamo per semplicità che da 1 t di combustibile al 3% di plutonio si ottenga una composizione del combustibile esausto simile al caso dell'uranio arricchito al 3%; in altri termini, tutto rimane invariato tranne che l' U^{235} è sostituito da Pu^{239} . In quest'ipotesi, il combustibile al plutonio esausto è così costituito:

- 29 kg di prodotti di fissione;
- $10+8,6=18,6$ kg di plutonio;
- 1 kg di attinidi;
- 951,4 kg di U^{238} .

L'insieme dei due combustibili esausti, all'uranio ed al plutonio, risulta composto da:

- 38,7 kg di prodotti di fissione;
- 1,3 kg di attinidi;
- 6,2 kg di plutonio;
- 8,6 kg di U^{235} ;
- 1268,5 kg di U^{238} .

Nonostante il considerevole beneficio in termini energetici, notiamo subito che gli elementi transuranici (ovvero i più radioattivi) sono diminuiti da 11 a 7,5 kg. Ma cerchiamo di confrontare meglio i risultati nei tre casi visti.

Ipotizziamo che i due combustibili, al 3% di plutonio ed al 3% di U^{235} , abbiano un comportamento simile anche in termini energetici. In altri termini, stiamo supponendo che, a parità di potenza installata, 1 t di combustibile al 3% di plutonio produca la medesima quantità di calore generata da 1 t di uranio arricchito al 3%. Ciò significa che, in presenza del riciclo di plutonio, da 752 kg di uranio arricchito al 3% si genera la stessa quantità di energia liberata, in assenza di riciclo, da 1 t di uranio arricchito al 3%.

	Ciclo aperto [kg]	Ciclo chiuso [kg]	Ciclo chiuso con riciclo del plutonio [kg]
Uranio minerale	4.285,70	4.032,80	3.032,20
Prodotti di fissione	29	29	29,1
Plutonio	10	10	4,7
Attinidi	1	1	1
U²³⁸ in eccesso	3.285,70	3.032,80	2.018,50

Tabella 3.1

Facendo riferimento all'energia generata da 1 t di uranio arricchito al 3%, si può calcolare quanto uranio minerale è stato consumato nei tre casi; ugualmente, nelle medesime ipotesi è possibile calcolare la composizione delle scorie del processo integrato di estrazione del minerale, produzione e consumo del combustibile nucleare. Sulla base dei dati riportati in tabella 3.1 si determina un'efficienza di impiego del combustibile di 0,93%, 0,99%, 1,15% rispettivamente nei tre casi di ciclo aperto, ciclo chiuso e ciclo chiuso con riciclo. Si tratta, in vero, di incrementi piuttosto consistenti che riducono enormemente il quantitativo di U²³⁸ da smaltire, ma, soprattutto, nel caso di riciclo del plutonio determinano quasi un dimezzamento delle scorie transuraniche ovvero le più pericolose.

Il riprocessamento del plutonio non è un mezzo di smaltimento delle scorie radioattive; pur tuttavia, consente di incrementare le riserve energetiche del mondo e, contemporaneamente, permette di ridurre considerevolmente la velocità di formazione delle scorie transuraniche.

Attualmente, nel mondo sono pochi gli impianti che impiegano combustibile nucleare riciclato. In primo luogo perché fino a pochi anni fa riciclare combustibile era molto costoso; in secondo luogo, perché la parola plutonio da sempre evoca il timore di impieghi bellici. Oggi gli impianti di trattamento delle scorie stanno aumentando in quanto molte delle grandi potenze militari hanno avviato piani di dismissione degli arsenali nucleari. La dismissione di armi atomiche, infatti, ha reso disponibili ingenti quantità di plutonio. Le opzioni possibili sono due: lo smaltimento o il

riciclo. Così, davanti al dilemma di scegliere tra un problema ed una risorsa, il mondo sta superando vecchie reticenze.

3.2.4 Il combustibile ad ossidi misti (MOX)

La maggiore parte degli impianti che oggi impiegano combustibile al plutonio consumano combustibile ad ossidi misti o MOX (acronimo di Mixed Oxide Fuel).

In generale, in un impianto di riprocessamento il plutonio formatosi durante il funzionamento dei reattori nucleari viene separato dal resto delle scorie e mescolato con U238, disponibile in abbondanza a valle dell'operazione di arricchimento dell'uranio naturale. Dal trattamento, si ottiene in ultimo una miscela di ossido di uranio (UO_2) ed ossidi di plutonio (PuO_2) che può essere impiegato come combustibile nucleare.

Attualmente in Europa circa una trentina di reattori impiegano MOX, ma si prevede che il numero sia destinato ad aumentare. Quasi tutto il MOX impiegato oggi in Europa proviene da quattro impianti dei quali due si trovano in Francia, uno in Belgio, uno in Gran Bretagna. Si stima che nell'anno 2000 siano state prodotte 190 t di MOX riciclando circa 12 t di plutonio.

3.2.5 Stima ed allocazione delle riserve di materiale nucleare

L'uranio è reperibile in quantità minime un po' ovunque. Si potrebbe perfino estrarre dall'acqua di mare: in questo caso, infatti, le stime parlano di circa 3 miliardi di tonnellate, sebbene siano presenti in concentrazione così diluita che non vale la pena estrarlo.

Però, facendo riferimento solamente alle riserve di semplice estrazione o, comunque, competitive sotto il profilo economico, si stima che le disponibilità sul nostro pianeta siano pari a circa 5 milioni di t. Paesi ricchi di uranio sono Australia, Africa, Kazakhstan e Canada.

Ai ritmi attuali di consumo, le riserve economiche di uranio dovrebbero esaurirsi in circa 50-60 anni.

Il Canada è il primo produttore di uranio al mondo con una produzione annuale che è sostanzialmente doppia rispetto all’Australia, seconda in classifica. Seguono, quindi, il Niger, la Namibia, gli Usa e la Russia, mentre in Europa solo la Francia ha una produzione apprezzabile.

Per valutare appieno il potenziale energetico nucleare nel mondo, però, alle riserve di uranio andrebbero aggiunte anche le “riserve” di plutonio. In realtà, il plutonio non è una fonte di energia primaria, ma riprocessato consente di generare combustibile nucleare utilmente impiegabile per il funzionamento di centrali elettronucleari. Scorie contenenti plutonio sono presenti in tutti i Paesi nei quali esistono o sono esistite centrali nucleari; dunque, anche in Italia. Pur tuttavia, le maggiori riserve di plutonio sono concentrate nei Paesi riconosciuti quali potenze militari nucleari: Stati Uniti, Regno Unito, Russia, Cina, India e Pakistan, paesi che hanno da sempre ammesso di possedere armi nucleari, ma, secondo la CIA, il servizio segreto statunitense, anche Israele e la Corea del Nord sarebbero da annoverare nel ristretto giro di quelli che possiedono testate nucleari. In questi Paesi, dunque, è ragionevole pensare che nel corso degli anni, di proposito, siano state prodotte considerevoli quantità di plutonio. Ovviamente vige il segreto militare, per cui non esistono stime attendibili in merito; di certo, però, nei Paesi che hanno avviato piani di riduzione degli armamenti atomici sono stati liberati ingenti quantitativi di plutonio, peraltro di ottima qualità (un elevato grado di purezza è un requisito fondamentale per la costruzione di bombe atomiche); diversamente dal plutonio di origine civile (che è mescolato a prodotti di fissione ed altre scorie), il plutonio militare, se riciclato, consente di produrre combustibile nucleare di gran pregio.

3.2.6 Il futuro dei reattori fissione nucleari

Dopo l'incidente di Chernobyl, nel mondo, per parecchio tempo non sono più stati commissionati impianti nucleari. Addirittura, in Italia, si è addivenuti alla determinazione finanche di chiudere le centrali nucleari di Piacenza, Caorso, Latina e Garigliano che stavano funzionando a pieno regime ed erano ben lungi dall'essere a fine vita.

Oggi, a seguito del diffondersi di una certa preoccupazione per le conseguenze del fenomeno del riscaldamento globale, il mondo inizia ad essere meno diffidente nei confronti delle tecnologie nucleari. Soprattutto è stata avviata una riflessione circa le caratteristiche e peculiarità che dovranno avere i reattori nucleare di ultima generazione.

I reattori nucleari di quarta generazione dovranno:

- accrescere il livello di sicurezza mediante integrazione di sistemi passivi di controllo e regolazione;
- migliorare l'efficienza di utilizzo del combustibile nucleare;
- funzionare a temperature molto più elevate al fine di incrementare il rendimento di conversione del ciclo a vapore sottostante.

L'obiettivo ultimo è realizzare impianti nucleari intrinsecamente sicuri ed efficienti, cosicché sia possibile vincere le reticenze di una certa parte della pubblica opinione e fornire energia a basso costo e limitato impatto ambientale.

La maggior parte delle centrali elettronucleari oggi attive nel mondo impiega reattori termici ovvero a neutroni rallentati (da un moderatore).

D'altronde, negli attuali reattori buona parte del combustibile nucleare non prende parte ai processi di fissione. Infatti, l' U^{238} , che è sempre l'elemento più abbondante nel combustibile nucleare, non è fissile: solo se colpito da un neutrone veloce ha qualche debole probabilità di scindersi. L' U^{238} è, però, "fertile": colpito da neutroni può assorbirne uno, innescando una reazione che, nel giro di pochi giorni, lo porta a trasformarsi in P^{239} che, alla pari dell' U^{235} è fissile.

In un reattore a neutroni veloci (cioè non rallentati e, quindi, ad alta energia) la probabilità che il materiale fertile si trasformi in materiale fissile è sicuramente più elevata. In generale, dunque, nel combustibile esausto di un reattore a neutroni veloci è possibile reperire un maggior contenuto di plutonio rispetto a quanto accade in un reattore termico.

Un reattore autofertilizzante (o FBR, acronimo di Fast Breeder Reactor) è un reattore a neutroni veloci che è progettato per produrre più materiale fissile di quanto ne consumi al suo interno. Un reattore autofertilizzante solitamente impiega combustibile al plutonio. Infatti, con questo tipo di combustibile, per ogni neutrone assorbito da materiale fissile si generano più neutroni rispetto al caso in cui si utilizzi uranio arricchito. Così, nonostante una parte dei neutroni sia assorbita dal materiale fertile per produrre altro plutonio, è possibile mantenere condizioni di massa critica. In buona sostanza, in un reattore autofertilizzante, il plutonio è contemporaneamente generato e consumato con differenza positiva in favore della generazione. Dunque, un reattore autofertilizzante teoricamente potrebbe alimentare a cascata uno o più reattori che impiegano combustibile al plutonio; si otterrebbe così un ciclo integrato in grado di riprocessare in continuazione il plutonio.

Addirittura mettendo in serie un reattore termico (che utilizza uranio), un reattore autofertilizzante (che utilizza combustibile al plutonio) ed un reattore termico (che utilizza combustibile al plutonio) sarebbe possibile, almeno in linea teorica, elevare l'efficienza di impiego dell'uranio minerale fino al 99%. Sarebbe così possibile:

- moltiplicare il potenziale energetico delle riserve di uranio di un fattore 99;
- generare energia, producendo scorie costituite al 99% da prodotti di fissione (che decadono in alcuni secoli anziché in migliaia di anni) e solo da un 1% di elementi transuranici (altamente radioattivi).

In altri termini, rispetto all'attuale sistema di produzione, sarebbe teoricamente possibile decuplicare la produzione e, contemporaneamente, abbattere di un fattore 10 la produzione annua di scorie.

Ma, allora, viene da chiedersi: “Perché il mondo non è pieno di reattori autofertilizzanti? E’ davvero possibile realizzarli”?

I reattori autofertilizzanti, tecnicamente parlando, sono già una realtà. Il più famoso di tutti è sicuramente il Superphenix, un reattore con una potenza di 3.000 MW termici che ha alimentato per circa 12 anni (dal 1986 fino al 1998) una centrale da 1.200 MW elettrici presso Creys Malville in Francia. La storia del Superphenix è stata costellata di problemi tecnici e politici. In 12 anni di attività, per ben 91 mesi non ha funzionato affatto e nei rimanenti 53 spesso la potenza è stata parzializzata. Da un punto di vista imprenditoriale, il progetto, cui ha anche partecipato l’Enel con un quota del 33%, è stato fallimentare. Ma da un punto di vista scientifico e tecnologico è stato un successo clamoroso perché, al di là di avere evidenziato alcune difficoltà tecniche sottovalutate o trascurate in sede progettuale, ha comunque dimostrato la fattibilità di procedere alla realizzazione di reattori autofertilizzanti.

D’altronde, non si può non considerare che il Superphenix sia entrato in esercizio nel 1986 ovvero nell’anno in cui è avvenuto il disastro di Chernobyl. Il Superphenix, insomma, è nato ed è cresciuto in un periodo poco favorevole per l’industria nucleare. Ciò ha sicuramente contribuito a mettere in cattiva luce una tecnologia che effettivamente potrebbe consentire di soddisfare il fabbisogno energetico mondiale senza ricorrere ai combustibili fossili ovvero evitando di immettere in atmosfera gas climalteranti.

Ma il vero motivo per cui i reattori autofertilizzanti non sono mai decollati è da ricercare altrove. I reattori autofertilizzanti impiegano combustibile derivante dal riprocessamento del plutonio. Preliminarmente, dunque, occorre riuscire ad estrarre materiale fertile dalle scorie plutonio. Fino a pochi anni fa ciò era possibile soltanto ricorrendo al metodo PUREX (acronimo per Plutonium URanium EXtraction), una tecnica sviluppata per soddisfare il bisogno da parte dell’industria bellica di plutonio di elevata purezza. Il più grosso freno allo sviluppo dei reattori autofertilizzanti è perciò stato dettato dal timore che qualcuno potesse impiegare per l’industria

bellica il plutonio apparentemente prodotto per scopi civili. Fortunatamente le cose stanno cambiando.

Per il funzionamento dei reattori autofertilizzanti, infatti, non è necessario disporre di plutonio di elevata purezza. Ed oggi sono state sviluppate nuove tecniche che consentono di estrarre plutonio con caratteristiche di purezza compatibili con quelle necessarie per l'alimentazione dei reattori autofertilizzanti. Mediante trattamenti "pirometallurgici", basati su tecniche di elettrodeposizione e manipolazioni ad alta temperatura, è oggi possibile estrarre dal combustibile esaurito una miscela di elementi transuranici. Tale miscela non è adatta né per l'uso bellico, né, invero, per l'impiego in reattori termici, ma ben si presta ad essere usata nei reattori veloci. Dunque, oggi esistono condizioni più favorevoli per lo sviluppo dei reattori autofertilizzanti poiché il rischio che il plutonio di origine civile possa essere impiegato per scopi bellici sembra definitivamente superato.

In ogni caso, il sistema di reattori veloci con trattamento pirometallurgico è decisamente versatile. Nella produzione di plutonio può dare un contributo netto non nullo (dunque, positivo o negativo), ma può essere fatto funzionare anche in modo da rimanere in pareggio. Impiegato come produttore di plutonio, il sistema sarebbe in grado di fornire i materiali iniziali per altri reattori veloci. Impiegato come consumatore, invece, sarebbe in grado di smaltire sia il plutonio sia i materiali per uso militare in eccesso. Se, infine, si sceglie un funzionamento in pareggio, per far funzionare il reattore sarebbe necessaria solo un'aggiunta periodica di materiale fertile.

Un'altra filiera di reattori autofertilizzanti prevede l'utilizzo come materiale fertile del torio-232. In questo caso il torio-232 passa a torio-233 (instabile), decadendo quindi a uranio-233 che è fissile e può essere impiegato per la produzione di combustibile nucleare. Si noti che U^{233} non è presente in natura, presentando un tempo di dimezzamento di $1,62 \times 10^5$ anni, ovvero estremamente basso se confrontato con i 700×10^6 e $4,5 \times 10^9$ anni rispettivamente dell' U^{235} e dell' U^{238} . Tra i problemi connessi a questo utilizzo rientrano gli elevati costi di produzione del combustibile, legati all'alta radioattività dell'uranio-233, che è sempre contaminato da tracce di uranio-232; problemi

simili dovuti all'altamente radioattivo ^{228}Th si incontrano anche nel riciclo del torio. Inoltre, U^{233} può inoltre essere impiegato per la produzione di ordigni nucleari e pone alcuni problemi tecnici per il suo riciclo. Tali difficoltà rendono per ora l'uso del torio come combustibile nucleare ancora improbabile, data l'abbondante disponibilità di uranio.

Nei reattori veloci per raccogliere il calore generato nel nocciolo non è possibile impiegare acqua, che fungerebbe da moderatore e rallenterebbe la velocità dei neutroni. Per ovviare al problema generalmente si usa un metallo liquido, per esempio, il sodio, sia come refrigerante sia come mezzo di trasmissione del calore. Il metallo liquido ha un grande vantaggio: i sistemi raffreddati ad acqua operano ad alta pressione, quindi una piccola perdita può svilupparsi rapidamente, provocando il rilascio di grandi quantità di vapore ed eventualmente una rottura delle tubature, con il rischio di grandi perdite di refrigerante. I sistemi a metallo liquido, invece, operano a pressione atmosferica, e quindi c'è una probabilità molto più bassa di perdite consistenti. Il sodio, però, brucia se è esposto all'acqua, e deve pertanto essere gestito con cautela. Nel corso degli anni è stata accumulata molta esperienza nell'uso di questo metallo e i metodi per la sua gestione sono abbastanza sicuri, anche se ci sono stati incendi e senza dubbio ce ne saranno altri. Un incendio causato dal sodio è avvenuto nel 1995, nel reattore veloce di Monju, in Giappone. Ha provocato danni nella struttura di contenimento del reattore, ma non ne ha messo a repentaglio l'integrità; nemmeno ci sono stati feriti e/o contaminazioni.

La necessità di dover ricorrere a metalli liquidi, comunque, ha anche qualche aspetto positivo: potendo salire di temperatura, si riesce a migliorare il rendimento del ciclo a vapore sottostante. Nel caso del Superphenix, per esempio, il liquido refrigerante era sodio liquido; così da 3.000 MW di potenza termica si ottenevano 1.200 MW di potenza elettrica, con un rendimento del 40%.

3.3 I REATTORI A FUSIONE NUCLEARE

In una reazione nucleare di fusione due nuclei leggeri collidono e si fondono. Si può verificare che la somma delle masse dei prodotti di reazione è più piccola della somma delle masse dei reagenti; la differenza si è trasformata in energia in accordo con l'equazione di Einstein $E=mc^2$.

La più semplice reazione di fusione ha origine quando un atomo di deuterio (D^2) ed un atomo di trizio (T^3) si combinano per dare origine ad elio (He^4); contemporaneamente, sono liberati calore ed un neutrone.

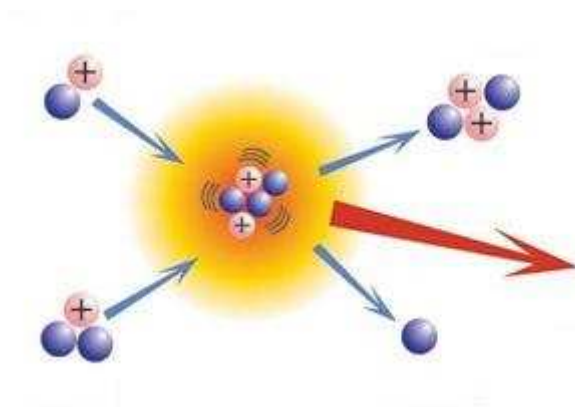
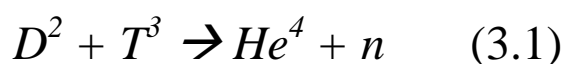


Figura 3.2

Nella reazione (3.1) la percentuale di massa trasformata in energia si aggira attorno all'1%, un quantitativo enorme. Da 10 g di D^2 e 15 g di T^3 , infatti, si ottiene l'energia media di cui ha bisogno una persona di una nazione industrializzata nella sua vita.

Per alimentare una reazione di fusione sono richieste temperature di lavoro dell'ordine di centinaia di milioni di gradi. Infatti, due nuclei di D^2 iniziano ad attrarsi per effetto dell'interazione nucleare solo a distanze confrontabili con le dimensioni nucleari ovvero a circa 10^{-15} m; a distanze maggiori, i due nuclei si respingono avendo cariche elettriche uguali. Per vincere le forze di repulsione elettrostatica sono necessarie grosse quantità di energia cinetica ovvero elevatissimi livelli termici.

Un reattore nucleare a fusione è un ipotetico sistema in grado di gestire una reazione di fusione nucleare in modo controllato.

3.3.1 Verso l'obiettivo

Allo stato attuale non esistono reattori operativi per produrre energia elettrica ma gli unici impianti attivi sono prototipi di ricerca in grado di sostenere la reazione di fusione nucleare per un tempo molto ridotto. La fattibilità scientifica di un reattore a fusione è già stata sostanzialmente dimostrata con gli esperimenti condotti negli scorsi anni; diversamente, non è possibile dire altrettanto per la fattibilità tecnologica. Però, poiché la fusione nucleare potrebbe in teoria fornire energia all'umanità per un tempo illimitato, si stanno effettuando ingenti investimenti in questo tipo di reattori anche se si ritiene che i primi impianti potranno essere operativi tra almeno 40 anni.

Tra i vari progetti di ricerca il più ambizioso attualmente è il progetto internazionale ITER (International Tokamak Experimental Reactor) che punta a sviluppare un reattore di test in grado di sostenere una reazione di fusione nucleare per diversi minuti. Verrà costruito a Cadarache, nel Sud della Francia da un consorzio di Unione Europea, Russia, Cina, Giappone, Stati Uniti d'America, India e Corea del Sud.

Il progetto ha un budget di ricerca di 10 miliardi di euro in 30 anni. Il progetto finale, che è ancora in fase di elaborazione, non mira a produrre direttamente energia elettrica ma punta a dimostrare la capacità dell'impianto di sostenere una reazione nucleare controllata basata sulla fusione nucleare che produca più energia di quanta ne consumi.

La produzione di energia elettrica verrà demandata ad un successivo progetto, denominato DEMO, che, a valle dell'esperienza di ITER, cercherà di integrare il reattore con tutte le infrastrutture necessarie per un'efficiente produzione di energia elettrica. Per ottenere una buona resa energetica il reattore del progetto DEMO dovrà essere necessariamente più grande del reattore ITER anche se le dimensioni definitive sono ancora oggetto di studio.

Dopo lo sviluppo del progetto DEMO si potrà lavorare all'ingegnerizzazione delle centrali nucleari a fusione per uso industriale tenendo in debita considerazione anche gli aspetti economici. La denominazione provvisoria in ambito europeo del progetto successivo a DEMO è PROTO.

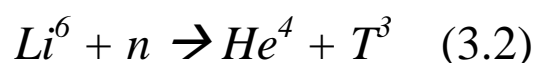
3.3.2 Le criticità

Nel caso di ITER, l'obiettivo è raggiungere temperature di $1,5 \times 10^8$ K; in queste condizioni, i reagenti sono completamente ionizzati e formano un plasma. Poiché, a temperature così elevate, nessun materiale sarebbe in grado di resistere, il confinamento del plasma è il problema principale della fusione. Nelle macchine sperimentali (tokamak) che hanno dato i migliori risultati, il plasma è stato creato e riscaldato in una camera a vuoto di forma toroidale; tutto il sistema è stato corredato da magneti che generano i fortissimi campi magnetici necessari per il confinamento del plasma. Nella realizzazione dei tokamak di maggiori dimensioni, per esempio il JET, sono state sviluppate in modo sufficiente molte delle tecnologie necessarie per il reattore, tra cui quelle per creare il vuoto, per configurare i magneti, per la messa a punto della sensoristica e della robotica. Le maggiori incertezze riguardano invece lo sviluppo di grossi magneti superconduttori che dovranno eccedere di un fattore 3 le dimensioni di precedenti esperienze sperimentali, una sfida tecnologica non da poco. Inoltre, il riscaldamento del plasma sarà realizzato tramite fasci di onde elettromagnetiche ad elevata frequenza; in ITER, uno dei problemi più studiati è la costruzione delle antenne necessarie a generare questi fasci.

Il tutto rende il processo difficile, tecnologicamente complesso, dispendioso non solo economicamente, ma anche energeticamente. C'è poi un ultimo aspetto da non sottovalutare: per raggiungere livelli termici di centinaia di milioni di gradi occorre investire grandi quantità di energia; il successo di ITER è subordinato all'obiettivo di ricavare energia in quantità almeno 10 volte superiore a quella necessaria per innescare il processo di fusione e sostenerlo.

3.3.3 I pregi

Il combustibile per le reazioni di fusione è facilmente reperibile. Il deuterio, infatti, è reperibile in natura; il trizio, invece, a causa del suo breve periodo di decadimento, è assente e, pertanto, in un impianto a fusione nucleare occorre generare la quantità di trizio richiesta per alimentare la centrale. Uno dei componenti chiave della futura centrale energetica a fissione sarà il cosiddetto blanket, laddove i neutroni in uscita dalla reazione di fusione sono utilizzati per produrre trizio a partire dal litio, secondo la reazione (3.2).



In ogni caso, 15 g di T^3 possono essere ricavati da 30 g di Li; per ITER, a fronte di una potenza termica erogata di 500-700 MW, è prevista una richiesta di trizio di circa 250 g al giorno., inoltre le centrali a fusione nucleare non immetterebbero in atmosfera agenti inquinanti e, tanto meno, gas climalteranti. L'isotopo più radioattivo che potrebbe essere disperso nell'ambiente è il trizio che ha un tempo di dimezzamento di 12,3 anni, un periodo molto ridotto rispetto alle migliaia di anni necessari per il decadimento degli isotopi più radioattivi prodotti dalle centrali a fissione.

Dal punto di vista della sicurezza, anzitutto occorre sottolineare che nelle centrali a fusione, come ITER e DEMO, è previsto il confinamento magnetico del plasma all'interno di un idoneo volume di controllo atto a garantire le elevate temperature necessarie per innescare la fusione; pertanto, in caso di fughe verso l'esterno, il processo si estinguerrebbe non appena i livelli termici iniziano ad abbassarsi. Questo garantisce molto nei confronti delle centrali a fissione, che comunque sono basate su reazioni a catena da moderare e che, potenzialmente, possono sfuggire ad ogni controllo. Inoltre, poiché reagenti in ingresso e prodotti di reazione in uscita sono assolutamente non radioattivi, gli unici radionuclidi nascono e muoiono in seno al processo e, dunque, l'entità di eventuali fughe radioattive è commisurato alla taglia dell'impianto ovvero è limitato ai radionuclidi presenti nell'impianto all'atto di un ipotetico incidente. Conseguentemente, anche in caso di incidente è sempre possibile dimensionare gli schermi radioprotettivi in maniera da

garantire il confinamento delle radiazioni all'interno della struttura per un tempo sufficientemente lungo (per esempio 100 anni) così da garantire l'ambiente circostante dal rischio di contaminazione.

In definitiva, la reazione di fusione nucleare produce, come unico tipo di scoria, He^4 ovvero un gas inerte e assolutamente non radioattivo (secondo la fisica nucleare è il nuclide più stabile possibile).

4. LE FONTI RINNOVABILI

In questo capitolo, saranno presentate peculiarità e potenzialità delle energie rinnovabili ovvero *basate su fonti comunemente ritenute inesauribili sulla nostra scala dei tempi*.

Quando si parla di fonti rinnovabili essenzialmente occorre riferirsi alle seguenti forme di energia:

- idroelettrica,
- eolica,
- biomasse,
- solare,
- geotermica.

Tutte le fonti sopra elencate saranno approfondite più specificamente nel prosieguo.

4.1 PREGI E LIMITI DELLE FONTI RINNOVABILI

Anzitutto le fonti rinnovabili sono caratterizzate da una durata del ciclo di utilizzo paragonabile a quella del ciclo di rigenerazione. Cerchiamo di capire meglio cosa significhi. I combustibili fossili, come è noto, rientrano nella categoria delle fonti “non rinnovabili”; pur tuttavia, limitando opportunamente i consumi pro-capite anche le fonti fossili potrebbero assurgere a fonti rinnovabili. Con una popolazione mondiale stabilmente al di sotto dei 7,5 miliardi di abitanti, ipotizzando che ogni milione di anni la Terra sia in grado di generare risorse fossili per 1.500 Gtep, carbone, petrolio e gas naturale potrebbero costituire una fonte rinnovabile se per un milione di anni ogni persona consumasse da fonte fossile meno di 0,2 kgep/anno ovvero 0,0002 tep/anno. Considerato che attualmente nel mondo si consumano 1,5 tep/anno per persona, è evidente che con gli attuali ritmi di consumo emerge per le fonti fossili un marcato carattere di non rinnovabilità. Se, però, fermo restando un consumo pro-capite di 1,5 tep/anno per persona, la

popolazione mondiale scendesse ad un milione di abitanti e si mantenesse al di sotto di tale soglia per un milione di anni, le fonti fossili potrebbero essere considerate rinnovabili. D'altronde, se si considera che il mondo intero guarda agli Stati Uniti come modello in termini di qualità della vita, visto che attualmente gli Statunitensi consumano 7,1 tep/anno per persona, affinché le fonti fossili possano rivendicare carattere di rinnovabilità sarebbe addirittura necessario che la popolazione mondiale scendesse a 211.000 abitanti.

Tutte le fonti rinnovabili determinano un bassissimo impatto ambientale, soprattutto in termini di emissioni inquinanti. In alcuni casi, infatti, l'impatto ambientale è principalmente di tipo paesaggistico.

Pur a fronte di pregi incommensurabili, purtroppo, le fonti rinnovabili presentano non pochi limiti.

Diversamente dalle fonti soggette ad esaurimento, l'energia da fonte rinnovabile in generale non può essere trasportata, eccetto le biomasse. D'altronde, l'energia da fonte solare, eolica e geotermica non può essere accumulata in maniera semplice, ma deve essere consumata immediatamente, salvo andare dispersa. Poiché le fonti rinnovabili non sono uniformemente distribuite né nello spazio, né nel tempo, i limiti circa trasportabilità ed accumulo sono pesanti.

Inoltre, la disponibilità di energia da fonti rinnovabili è limitata superiormente da processi naturali: una volta saturata l'offerta energetica della singola fonte, non è possibile andare oltre attingendo a riserve.

In più, tutte le fonti rinnovabili sono caratterizzate da densità di potenza energetica molto basse. Mentre le fonti fossili consentono di generare densità di potenza dell'ordine di $1.000\div 10.000\text{ W/m}^2$, non è possibile andare oltre i 60 W/m^2 con il fotovoltaico, oltre i 20 W/m^2 con l'eolico, oltre i 50 W/m^2 con l'idroelettrico in alta quota; addirittura con l'idroelettrico di bassa quota e le biomasse la densità di potenza scende ulteriormente di uno o due ordini di grandezza. Dunque, lo sfruttamento delle fonti rinnovabili richiede disponibilità di ampi spazi; si tratta di un limite non da poco soprattutto nei grandi addensamenti urbani. Il vincolo della bassa densità di potenza, in taluni,

casi può diventare ancora più stringente: lo sfruttamento di risorse energetiche presuppone sempre spesa energetica preliminare. Nel caso del petrolio, per esempio, per estrarre 10 t di petrolio occorre spenderne una. La convenienza di un investimento energetico è misurata dal cosiddetto EROEI (Energy Return On Energy Investment) che può così essere definito:

$$EROEI = \frac{E_{ricavata} - E_{investita}}{E_{investita}}$$

In generale, l'EROEI consente di valutare la convenienza di sfruttare una fonte energetica. Nel caso di fonti soggette ad esaurimento, l'EROEI è almeno pari a 10 ovvero l'investimento energetico per realizzare ed esercire gli impianti rappresenta una percentuale minima di ciò che sarà generato durante il funzionamento. Quando, però, la fonte energetica è a bassa densità di potenza, ritorni ed investimenti energetici diventano comparabili. Dunque, prima di avviare lo sfruttamento di una fonte, è sempre necessario procedere ad un'attenta valutazione preliminare onde evitare di ottenere una perdita in luogo di un utile energetico. Nel caso delle biomasse, per esempio, questo rischio è estremamente elevato: poiché stiamo parlando di una fonte a bassissima densità energetica (anche meno di 1 W/m²) capita spesso che i costi energetici di produzione, raccolta, modellazione e trasporto siano così alti da determinare un EROEI negativo.

In generale, dunque, lo sfruttamento delle fonti rinnovabili non può essere avviato in maniera automatica, ma deve essere orientato a massimizzare i pregi ed a minimizzare i difetti.

4.2 I RAPPORTI DI FORZA TRA LE ENERGIE RINNOVABILI

Ad eccezione della fonte geotermica, tutte le principali fonti rinnovabili sono riconducibili direttamente o indirettamente all'energia generata nel Sole. Occorre, però, distinguere lo sfruttamento diretto, propriamente energia solare, dalle altre fonti di origine solare.

L'energia idroelettrica, l'energia eolica e le biomasse sono forme energetiche non ovunque disponibili, al contrario dell'energia solare che è praticamente onnipresente, sebbene in misura non uniforme. Di contro, le prime tre sono economicamente competitive con le fonti tradizionali, ma purtroppo con gli attuali ritmi di consumo il loro contributo al fabbisogno energetico mondiale non può che essere marginale. Lo sfruttamento dell'energia solare, invece, potrebbe in linea teorica consentire di soddisfare l'intero fabbisogno energetico dell'umanità, ma è poco competitivo sotto il profilo economico ragion per cui la fonte solare, almeno fino ad ora, non ha mai recitato un ruolo di primo piano.

Le risorse idroelettriche ed eoliche sono utilmente impiegate dall'uomo da tempo. L'energia idroelettrica ed eolica possono essere convertite, facilmente e con rendimenti elevati, in energia meccanica e, di qui, in energia elettrica. Pur tuttavia, la disponibilità di queste fonti è limitata superiormente dalla presenza di idonei bacini idroelettrici ed opportune condizioni di ventosità.

Le biomasse, con le tecnologie oggi a disposizione, possono essere utilmente impiegate per generare energia termica di buon livello energetico e, soprattutto, non sono soggette ad un funzionamento intermittente; in generale, però, il loro contributo al fabbisogno energetico mondiale è limitato superiormente dai bassi rendimenti di conversione della fotosintesi clorofilliana che è il processo attraverso cui piante, alberi ed organismi vegetali in genere fissano la CO₂, riducendola, per provvedere al proprio sostentamento ed accrescimento.

Diversamente, almeno in prima analisi, lo sfruttamento diretto dell'energia solare è limitato superiormente soltanto dalla disponibilità di spazi su cui installare le superfici di captazione. Ma cerchiamo di fornire considerazioni quantitative a supporto di quanto affermato.

L'energia solare arriva sulla Terra sotto forma di radiazione elettromagnetica di lunghezza d'onda compresa tra 0,2 e 3 mm. Quando la distanza Terra-Sole è pari al suo valore medio, la potenza raggiante incidente su una superficie di area unitaria disposta ai limiti dell'atmosfera terrestre e perpendicolarmente ai raggi solari rappresenta la costante solare G_{cs} , pari a 1.353 W/m^2 . Diversamente, la potenza raggiante G che incide su una superficie di area unitaria disposta ai limiti dell'atmosfera terrestre e perpendicolarmente ai raggi solari varia istante per istante a causa del moto di rivoluzione della Terra intorno al Sole: in un anno solare, solo in due istanti (precisamente del 3 aprile e del 22 ottobre) G coincide con G_{cs} ; tuttavia, poiché le distanze minima e massima sono abbastanza vicine in termini relativi, il rapporto G/G_{cs} , non è molto diverso dall'unità, variando tra 0,97 ed 1,04.

Quanto vale in termini assoluti l'energia solare? Approssimando la Terra ad una sfera, in prima approssimazione, è possibile ricavare che la potenza raggiante che arriva ai limiti dell'atmosfera terrestre è pari al prodotto della costante solare per la proiezione della calotta emisferica irraggiata su un piano ortogonale alla congiungente Terra-Sole. Assumendo $R_T=6.373 \text{ km}$ si ottiene una potenza raggiante di 172.627 TW ovvero $4.123.117 \text{ tep/s}$ (avendo considerato $1 \text{ tep} = 41,868 \text{ GJ} = 0,041868 \text{ TJ}$). Ciò significa che in un anno ai limiti dell'atmosfera arrivano circa 130.000 Gtep . Ricordando dal capitolo introduttivo che i consumi mondiali sono stati pari a $10,878 \text{ Gtep}$ nel 2006, si deduce che la disponibilità di energia solare ai limiti dell'atmosfera è oltre 10.000 volte il fabbisogno energetico mondiale.

Naturalmente, non tutta la potenza raggiante che arriva ai limiti dell'atmosfera terrestre raggiunge il pianeta ad altezza dei mari e delle terre emerse: poiché circa il 29% ed il 18% sono rispettivamente riflessi ed assorbiti dall'atmosfera, solo un 53% raggiunge la crosta terrestre. In termini assoluti, si tratta di circa 68.800 Gtep/anno , un dato superiore al fabbisogno energetico mondiale di ben oltre 6.000 volte. La maggior parte della potenza raggiante che raggiunge la superficie terrestre viene riflessa (particolarmente dagli specchi di acqua) o assorbita. Una piccola parte, però, si trasforma: circa 280 Gtep/anno fanno evaporare l'acqua dei mari, circa 260 generano

moti ventosi, circa 55 vengono trasformati in energia chimica per fotosintesi clorofilliana, solo lo 0,41% può teoricamente diventare energia idroelettrica, lo 0,38% energia eolica, lo 0,08% energia chimica da biomassa di origine naturale. Se anche consideriamo che una buona parte dell'energia che raggiunge la crosta terrestre è riflessa, anche considerando inutilizzabile la frazione di energia assorbita dai mari, non è difficile concludere che il potenziale di energia solare teoricamente disponibile è di due ordini di grandezza superiore alla somma della disponibilità teorica di energia idroelettrica, eolica e da biomasse.

Anche considerando il geotermico, i rapporti tra le grandezze in gioco non cambiamo. Infatti, nonostante la fonte geotermica sia molto competitiva dal punto di vista economico, in Italia nel 2006 sono stati generati appena 5.527 GWh su una produzione nazionale di 314.090 GWh, ossia solo l'1,8% del totale. Vista la competitività economica del geotermico, è facile convincersi che non si va oltre poiché non ci sono margini di ulteriore sfruttamento. Se, poi, consideriamo che nel resto del mondo la disponibilità di pozzi geotermici è ancora inferiore rispetto al caso italiano, si capisce che il contributo del geotermico al fabbisogno mondiale non può che essere marginale, se non irrisorio.

Di contro, lo sfruttamento diretto dell'energia solare può veramente apportare un contributo sostanziale al fabbisogno energetico mondiale. Ma finora questo non è accaduto, perché al contrario delle altre fonti che riescono ad essere economicamente competitive (e, dunque, preziose per quelle piccole comunità nelle quali riescono a svolgere un contributo sostanziale), il solare non lo è mai stato a causa degli elevatissimi costi fissi di installazione che fanno schizzare il costo dell'energia prodotta nonostante un input energetico gratuito.

5 L'ENERGIA IDROELETTRICA, EOLICA E GEOTERMICA

In questo capitolo saranno presentati dei brevi cenni circa l'energia idroelettrica, eolica e geotermica. Queste fonti sono accomunate perché legate a specifiche caratteristiche geomorfologiche che fanno sì che, a differenza della fonte solare diretta e delle biomasse (che saranno approfondite singolarmente in specifici capitoli), non sono uniformemente diffuse ma il loro impiego è limitato ad ambiti territoriali più o meno ristretti.

5.1 L'ENERGIA IDROELETTRICA

Migliaia di anni fa l'uomo ha imparato a sfruttare l'energia meccanica prodotta dalla caduta dell'acqua. Già Greci e Romani usavano dei mulini ad acqua per macinare il grano. A Barbegal, in Francia, nei pressi di Arles, importante porto che riforniva Roma di grano, sono stati trovati dei mulini idraulici a otto ruote che sfruttavano contemporaneamente lo stesso corso d'acqua (310 d.C.). In Europa, però, lo sfruttamento dell'energia idraulica per ricavare lavoro meccanico si sarebbe massicciamente diffuso solo nei secoli XII e XIII. Il principale utilizzo riguardava il settore agricolo e quindi la macinazione, mediante mulini ad acqua, di granaglie, ma anche olive, sale e altri minerali. Seppure molto meno diffusi dei mulini, tra il Cinquecento e il Seicento sono stati realizzati altri macchinari alimentati dalla corrente dei ruscelli. Uno dei più prolifici inventori di queste macchine fu proprio Leonardo da Vinci.

Sempre nel Medioevo, trovò grande diffusione anche la ruota ad acqua inventata dai Greci: una specie di mulino che serviva per sollevare l'acqua, utilizzato nella bonifica dei terreni paludosi, nell'irrigazione e nell'attività mineraria. La ruota idraulica, corredata di albero a camme permise, inoltre, di riprodurre un movimento verticale discontinuo, come quello del martello e fu così utilizzata per stampare tessuti ed azionare mantici che servirono a sviluppare l'attività metallurgica.

Un progresso tecnico di enorme portata si è avuto in seguito all'evoluzione della ruota idraulica nella turbina, un apparecchio capace di trasformare l'energia meccanica in energia elettrica. La nascita della turbina idraulica risale alla fine dell'Ottocento. Da allora questa tecnologia è stata ulteriormente perfezionata e oggi il rendimento complessivo degli impianti più moderni supera l'80%.

5.1.1 Le tipologie di impianti

Il principio su cui si basano le centrali idroelettriche è quello di trasformare l'energia potenziale di una massa di acqua in quiete e/o l'energia cinetica di una corrente di acqua in energia meccanica; successivamente questa energia meccanica verrà trasformata in energia elettrica. Gli impianti idroelettrici si suddividono in grandi impianti idroelettrici (o più semplicemente idroelettrici) ed in impianti idroelettrici minori (o mini-idroelettrici); la suddivisione avviene in base alla potenza installata nell'impianto e si può assumere come valore di soglia la potenza di 10 MW (in realtà in Italia si parla di idroelettrico minore fino al limite di 3 MW). Questa suddivisione solitamente si riscontra anche nella diversa tipologia degli impianti: mentre i grandi impianti idroelettrici richiedono solitamente la sommersione di estese superfici, con notevole impatto ambientale e sociale, un piccolo impianto idroelettrico si integra quasi perfettamente nell'ecosistema locale (si sfrutta direttamente la corrente del fiume).

Le centrali idroelettriche sono caratterizzate anche da una grande flessibilità di utilizzo. Grazie agli odierni sistemi di automazione, infatti, è possibile passare dallo stato di centrale ferma a quello di massima potenza in poche decine di minuti. Per questa loro peculiarità, le centrali idroelettriche sono più rapide di quelle termoelettriche nell'incrementare la loro produzione di energia elettrica nelle ore di maggiore richiesta.

Il processo produttivo idroelettrico è, dunque, conveniente non soltanto sotto il profilo economico ed ambientale, ma anche sotto quello dell'efficienza operativa.

Gli impianti idroelettrici possono anche essere definiti in base alla tipologia impiantistica come impianti a deflusso regolato o ad acqua fluente.

I primi sono impianti a bacino idrico naturale (laghi) o artificiale; più spesso sono bacini naturali nei quali è stata incrementata la capacità di accumulo con sbarramenti ovvero dighe alte anche centinaia di metri. Negli impianti a deflusso regolato si può modificare il regime delle portate utilizzate dalla centrale. Sono oggi gli impianti idroelettrici più potenti e più sfruttati, ma hanno un notevole impatto ambientale comportando violente alterazioni degli ecosistemi naturali. Possono essere usati come “accumulatori” di energia elettrica da utilizzare nelle ore di punta pompando acqua da valle a monte nelle ore “vuote”. In genere queste centrali sono superiori ai 10 MW di potenza e arrivano a potenze enormi: ad esempio, l'impianto di Itaipu in Brasile ha un bacino con un estensione di 1.460 km² (circa 4 volte il lago di Garda).

Gli impianti ad acqua fluente erano molto più usati all'inizio del secolo scorso, soprattutto per azionare macchine utensili in piccoli laboratori. Oggi il potenziale di questi impianti è meno utilizzato di quanto si potrebbe. Inoltre l'impatto ambientale di tali impianti può essere contenuto e limitato. Tali impianti non dispongono di alcuna capacità di regolazione degli afflussi, per cui la portata sfruttata coincide con quella disponibile nel corso d'acqua (a meno di una quota detta deflusso minimo vitale, necessaria per salvaguardare l'ecosistema); quindi la turbina produce energia con modi e tempi totalmente dipendenti dalla disponibilità del corso d'acqua: se il corso d'acqua è in magra e si scende sotto un livello minimo di portata, cessa la produzione di energia elettrica. In Svizzera le centrali ad acqua fluente coprono il fabbisogno elettrico di base.

5.1.2 Alcuni dati

Nel 2006 in Italia su un totale di 314 TWh elettrici generati, oltre 43 sono stati generati da impianti idroelettrici: l'idroelettrico ha contribuito con una percentuale del 13,8%.

Nel 2006 nel mondo su un totale di 19.028 TWh elettrici generati, 3.040 sono stati generati da impianti idroelettrici: l'idroelettrico ha contribuito con una percentuale del 16%.

In Italia storicamente la risorsa idroelettrica ha costituito la principale fonte di produzione di energia rinnovabile. Oggi, però, l'idroelettrico contribuisce alla produzione italiana in misura inferiore alla media mondiale.

Le potenzialità di sviluppo riguardano oggi impianti idroelettrici di dimensione ridotta (1-2 MW), sia laddove vi siano portate interessanti e la possibilità di realizzare salti e interventi di limitato impatto nei confronti dei bacini idrografici, sia nel recuperare strutture esistenti lungo i fiumi (come condotte, depuratori, acquedotti in disuso).

Il primato, per quanto riguarda la potenza installata, spetta all'impianto idroelettrico di Itaipú sul Rio Paraná, tra Brasile e Paraguay, inaugurato nel 1982, che ha la più grande capacità del mondo (12.600 MW a pieno regime).

Attualmente sono in costruzione nuovi impianti idroelettrici nel mondo per una ulteriore capacità produttiva complessiva pari a 108 GW. Paesi in forte espansione demografica ed economica, come la Cina, l'India, la Turchia e l'Iran stanno adottando grossi programmi di sviluppo di questa fonte energetica

Attualmente l'energia idroelettrica rappresenta più del 50% della fornitura di energia elettrica in circa 65 paesi, più dell'80% in 32 paesi e circa il 100% in 13 paesi.

Il potenziale di sviluppo di tale fonte energetica rinnovabile è localizzato soprattutto in Africa, Asia ed America, bisogna, però, distinguere tra impianti tecnicamente realizzabili e impianti economicamente convenienti, dal momento che spesso le condizioni orografiche rendono particolarmente costosa l'installazione di centrali idroelettriche. I potenziali di sviluppo sono riportati nella tabella 5.1.

	Potenziale tecnicamente fattibile [TWh/anno]	Potenziale economicamente fattibile [TWh/anno]
Africa	1750	1000
Asia	6800	3600
Nord Centro America +	1660	1000
Sud America	2665	1600

Tabella 5.1 - Potenziali idroelettrici di sviluppo nel mondo

Si può calcolare che sulla base della produzione mondiale del 2006 e dei dati di tabella 5.1, l'incremento potenziale della produzione idroelettrica è pari al 38% tenendo conto degli impianti economicamente competitivi ed al massimo è possibile arrivare al 68%. Riportando la produzione idroelettrica in energia primaria mediante un fattore di conversione pari a 0.38, si capisce che lo sviluppo dell'idroelettrico può determinare al massimo una riduzione di qualche punto percentuale dei consumi da fonte fossile.

5.2 L'ENERGIA EOLICA

L'uomo ha imparato a sfruttare l'energia cinetica del vento migliaia d'anni fa. La navigazione a vela risale, infatti, ad almeno diecimila anni fa, mentre i primi mulini a vento di cui sono state trovate le tracce sono persiani e risalgono al 200 a.C. Erano costruiti in modo molto semplice, con vele fissate a telai di legno. Nei secoli seguenti i mulini a vento si diffusero in tutto il Medio Oriente, diventando una macchina d'uso corrente in agricoltura.

Poi, tra il 1200 e il 1300 trovarono impiego anche in Europa, soprattutto nei paesi del Nord. Lo stesso Leonardo Da Vinci contribuì all'evoluzione di queste macchine.

Intorno al 1600 furono introdotte tecnologie più raffinate: furono perfezionati i profili delle pale al fine di migliorarne l'aerodinamica e sfruttare meglio la forza del vento.

L'invenzione della dinamo, da parte del belga Gramme, nella metà del diciannovesimo secolo, aprì nuovi orizzonti all'utilizzo dell'energia idraulica ed eolica e nel 1887 il francese Duc de La Peltrie costruì il primo aerogeneratore realizzato in Europa e destinato alla produzione di energia elettrica: iniziava così lo sfruttamento dell'energia eolica per fini industriali. Nel medesimo periodo, infatti, anche gli Stati Uniti realizzavano il primo "mulino a vento" per produrre elettricità (Charles Brush, Ohio, 1890).

La produzione di energia elettrica da energia eolica si è poi sviluppata tra il 1920 e il 1930, in seguito all'evoluzione di turbine per la trasformazione dell'energia idraulica.

Infine, la crisi petrolifera del 1973 ha fatto rinascere l'interesse per le fonti energetiche rinnovabili, tra cui quella eolica, che in certi casi si dimostra competitiva con i combustibili fossili. I mulini moderni sono molto più veloci ed efficienti di quelli d'inizio secolo. Hanno un minor numero di pale e, rispetto ai mulini tradizionali, riescono a produrre il doppio dell'energia.

5.2.1 Le tipologie di impianti

La più importante forma di impiego dell'energia eolica è quella relativa alla produzione di energia elettrica attraverso i generatori eolici, anche detti aerogeneratori.

L'energia elettrica si ottiene sfruttando l'energia cinetica del vento: le masse d'aria in movimento ad una velocità superiore ai 10 chilometri orari fanno girare le pale di un'elica; queste a loro volta sono collegate ad un generatore che trasforma l'energia meccanica in energia elettrica.

Esistono aerogeneratori diversi per forma e dimensione. Possono, infatti, avere una, due o tre pale di varie lunghezze: quelli con pale lunghe 50 centimetri vengono utilizzati come caricabatteria, quelli con pale lunghe circa 30 metri sono in grado di erogare una potenza di 1500 kW, riuscendo a soddisfare il fabbisogno elettrico giornaliero di circa 1.250 famiglie.

In ogni caso, un tipico aerogeneratore è costituito da una torre di acciaio di altezza compresa tra i 60 ed i 100 metri, con due o tre pale lunghe circa 20 metri: può generare una potenza di 600 kW che equivale al fabbisogno elettrico giornaliero di circa 500 famiglie.

Le pale del generatore eolico sono fissate su un elemento meccanico chiamato mozzo a formare l'elemento dell'aerogeneratore chiamato rotore. A seconda della posizione dell'asse attorno a cui ruota questo meccanismo, si distinguono rotor ad asse orizzontale e rotor ad asse verticale. I primi sono i più noti e diffusi, i secondi sono stati utilizzati fin dall'antichità, ma solo ultimamente sono oggetto di studi e ricerche per migliorarne l'efficienza. I principali vantaggi dell'asse verticale sono il costante funzionamento indipendentemente dalla direzione del vento e la migliore resistenza con venti veloci e turbolenti.

La struttura di un generatore eolico con rotore ad asse orizzontale è semplice: un sostegno (formato da fondamenta e torre) reca alla sua sommità una gondola o navicella. In questo involucro sono contenuti l'albero di trasmissione lento, il moltiplicatore di giri, l'albero veloce, il generatore elettrico e i dispositivi ausiliari (sistema frenante e sistema di controllo).

All'estremità dell'albero lento è fissato il rotore, costituito dal mozzo sul quale sono montate le pale. Queste ultime devono essere disegnate in modo che il rotore sfrutti al meglio il flusso dell'aria che lo investe. Dal rotore, l'energia cinetica del vento viene trasmessa a un generatore di corrente. Il generatore eolico funziona a seconda della forza del vento. Al di sotto dei 4/5 metri al secondo non può partire. La velocità minima che permette alla macchina di fornire la potenza di progetto è solitamente di 10÷12 m/s, sebbene in alcuni casi i progressi nel disegno dei rotor eolici permettano di operare anche con velocità del vento inferiori.

Ad elevate velocità (20÷25 m/s) l'aerogeneratore viene spento per ragioni di sicurezza.

Sono stati messi a punto anche dei rotor con pale “mobili”: variando l'inclinazione delle pale al variare della velocità del vento è possibile mantenere costante la quantità di elettricità prodotta dall'aerogeneratore.

Più aerogeneratori collegati insieme formano le cosiddette “fattorie del vento” o “*wind farm*”, che sono delle vere e proprie centrali elettriche.

Nelle *wind farm* la distanza tra gli aerogeneratori non è casuale, ma viene calcolata per evitare interferenze reciproche che potrebbero causare diminuzioni di produzione di energia. Di regola gli aerogeneratori vengono situati ad una distanza di almeno cinque-dieci volte il diametro delle pale. Nel caso di un aerogeneratore medio, con pale lunghe circa 20 metri, questo significa installarne uno ogni 200 metri circa.

Esistono *wind-farm* terrestri, anche dette “*on-shore*”, e marine, anche dette “*off-shore*”.

Le centrali in mare rappresentano un’utile soluzione per quei paesi densamente popolati con forte impegno del territorio in prossimità della costa marina. La tecnologia degli aerogeneratori da utilizzare in siti *off-shore* è in pieno sviluppo: a livello commerciale esistono già macchine da 1 MW e si stanno sperimentando prototipi da circa 3 MW.

I sistemi eolici possono essere collocati in maniera ottimale in mare aperto (almeno quando i fondali sono poco profondi): è così possibile ridurre l’impatto ambientale in termini paesaggistici e sfruttare la maggiore costanza del vento dovuta alle brezze marine. Generalmente tali impianti sono costituiti da grandi torri con pale ad asse orizzontale. Secondo alcune stime, gli impianti eolici nei mari europei potrebbero fornire oltre il 20% del fabbisogno elettrico dei paesi costieri.

Attualmente in Europa sono operative 5 centrali *off-shore* installate in Olanda, Svezia e Danimarca con una potenza totale di 30 MW.

In Italia non esiste ancora alcun impianto *off-shore*, ma è stato calcolato che sia disponibile un potenziale di circa 3000 MW; altrettanto è disponibile in terraferma. In ogni caso, si tratta di contributi minimi rispetto alle esigenze del paese.

5.2.3 Alcuni dati

Negli ultimi anni la produzione di energia eolica si è molto sviluppata soprattutto in Europa e sta crescendo sempre più. Il rapporto 2002 preparato da Euroobserver (organizzazione no profit che funge da osservatorio europeo) indica una capacità di produzione elettrica dell'eolico in tutto il mondo che ha ormai superato i 30.000 MW, tanto da poter soddisfare i bisogni di 18 milioni di abitazioni. L'Europa da sola rappresenta i tre quarti (74,3%) della capacità mondiale con i suoi 23.291 MW prodotti, con una crescita del 33% rispetto all'anno precedente. Del resto l'eolico, attualmente, contribuisce soltanto al 2% del totale del fabbisogno di energia in Europa.

La Germania è il vero leader mondiale con 12.000 MW, seguita dalla Spagna (4.830 MW) e dagli Stati Uniti (4.685 MW).

Ancora moltissimi territori potrebbero essere utilizzati per generare energia eolica in aree scarsamente popolate e in regioni ventose come le grandi pianure del Nord America, il nordovest della Cina, la Siberia Orientale e le regioni argentine della Patagonia, oltre all'enorme potenziale degli impianti *off-shore*.

Nel nostro Paese, i venti sono condizionati da diversi fattori: il clima dell'area mediterranea e l'orografia del territorio non sono molto favorevoli perché la disponibilità di siti ventosi entro 100 m dal suolo è molto inferiore a quella riscontrabile nei paesi europei che si affacciano sull'oceano.

L'Italia può comunque contare, specie nelle zone meridionali e nelle isole, su venti di buona intensità, quali il maestrale, la tramontana, lo scirocco e il libeccio.

L'Italia occupa il sesto posto della classifica europea di produzione di energia eolica (780 MW), ma si stima che la potenza installabile sia di circa 15.000 MW. I risultati di una recente indagine (cui ha partecipato anche l'ENEA) hanno evidenziato che i siti più idonei allo sfruttamento dell'eolico si trovano lungo il crinale appenninico, al di sopra dei 600 metri sul livello del mare, e, in misura minore, nelle zone costiere. Le regioni con caratteristiche più interessanti ai fini dell'eolico sono concentrate in Abruzzo, Molise, Campania, Puglia e Sardegna. Più in particolare,

zone particolarmente interessanti si trovano nelle province di Trapani, Foggia, Benevento, Avellino e Potenza.

La maggiore diffusione dell'eolico nel nostro paese si è registrata tra il 1999 e il 2002, quando gli impianti sono più che raddoppiati.

5.3 L'ENERGIA GEOTERMICA

L'utilizzo delle acque geotermiche è antichissimo e risale probabilmente al Paleolitico superiore. Tuttavia, il suo sviluppo in chiave più specificamente sanitaria, ha avuto origine in Giappone e in Italia circa 2000 anni fa. Ma, mentre in Giappone si è limitato entro i confini nazionali, dall'Italia i Romani lo hanno diffuso in tutte le regioni dell'Impero (Ungheria, Germania, Francia, Spagna, Gran Bretagna, Turchia e Paesi Arabi).

Solo a partire dal Rinascimento, però, il termalismo è stato trattato in maniera scientifica, con la stampa del "*De Thermis*", scritto da Andrea Bacci (Venezia, 1571). Da quel momento, tra il diciassettesimo e il diciottesimo secolo, si costruiscono in Europa numerosi stabilimenti termali, con la funzione di centri terapeutici per la cura del corpo e dello "spirito". Oltre all'Italia, che è il paese più rinomato d'Europa con oltre 170 centri termali, sono importanti anche l'Ungheria con Budapest (forte di una tradizione risalente agli antichi Romani) e l'Islanda.

Gli usi energetici dei fluidi geotermici si svilupparono più tardi di quelli termali.

Il primo impianto industriale per la produzione di energia fu costruito nel 1827 a Larderello, in Toscana. A quell'epoca, Francesco Larderel era proprietario di un impianto che produceva acido borico estraendolo dalle acque circolanti nel sottosuolo della zona. Egli pensò di far evaporare le acque boriche bruciando la legna dei boschi vicini, ritenendo di poter sfruttare il calore naturalmente contenuto in queste acque. L'idea ebbe successo e, fino al 1875, l'industria chimica di Larderel, nel settore dei prodotti borici, divenne la più importante del mondo. Sempre a Larderello, nel 1913, fu costruito il primo impianto per la produzione di elettricità di origine geotermica.

A partire dagli anni '20, l'attività geotermica si diffuse anche in Giappone, Islanda e Ungheria e poi, dagli anni '50, nel resto del mondo.

5.3.1 Le tipologie di impianti

Gli impianti geotermici si distinguono in sistemi ad alta temperatura e sistemi a medio/bassa temperatura a seconda che il fluido geotermico sia sopra o sotto i 140°C.

I **sistemi ad alta temperatura**, se il fluido geotermico si trova sotto forma di vapore, sono detti “a vapore dominante”. In questo caso, l'energia geotermica viene utilizzata principalmente per produrre energia elettrica.

Se il fluido geotermico si trova nel sottosuolo sotto pressione e, dunque, allo stato liquido anche ad alta temperatura, si parla di sistemi cosiddetti "ad acqua dominante". Quando un pozzo geotermico viene perforato, la pressione diminuisce bruscamente e l'acqua vaporizza, risalendo in superficie come miscela di acqua e vapore. In questi casi, l'energia geotermica può essere utilizzata per impieghi di carattere termico o per produrre energia elettrica.

I sistemi a medio/bassa temperatura contengono fluidi a temperature comprese tra i 140 e i 90°C che vengono impiegati in campo civile (per il riscaldamento ed il raffreddamento di edifici, quartieri o città), agricolo (per l'essiccamento di prodotti agricoli ed il riscaldamento e serre), per l'acquacoltura geotermica, cioè l'allevamento di specie acquatiche in vasche a temperatura controllata o per l'impiego in qualsiasi attività che richieda calore. In particolare, il teleriscaldamento è uno dei modi più interessanti per usare direttamente i fluidi geotermici a bassa temperatura (80-100 gradi centigradi). Consiste nell'usare il fluido geotermico per scaldare tramite degli scambiatori di calore, l'acqua circolante nei corpi scaldanti (radiatori, termoconvettori o pannelli radianti) degli impianti di riscaldamento delle abitazioni.

In alcuni casi, poi, l'energia geotermica è suscettibile di usi “multipli” in cascata: capita quando un fluido geotermico, dopo essere stato impiegato una prima volta, ha ancora del calore residuo da utilizzare in un altro impianto che necessita di calore a più bassa temperatura.

L'area sfruttabile nell'ambito di un sistema geotermico si definisce “campo geotermico”. Un campo ad alta temperatura viene quasi sempre collegato a una centrale per la produzione di energia elettrica. Questo impianto si differenzia da una centrale termoelettrica solo perché il vapore necessario per muovere le turbine e produrre elettricità, non è ottenuto bruciando combustibili fossili, ma è un prodotto naturale del sottosuolo.

In un campo “a vapore dominante”, come quello di Larderello, il vapore viene inviato direttamente alla turbina. Dopo l'utilizzo, il vapore esausto, viene condensato per depurarlo dai gas incondensabili (ad esempio, anidride carbonica) e nuovamente iniettato nel sottosuolo attraverso appositi pozzi, così da mantenere il giusto livello di pressione nel serbatoio.

In un campo ad “acqua dominante” la miscela acqua/vapore che fuoriesce dal pozzo geotermico viene fatta passare attraverso un separatore dove il vapore da inviare in turbina è diviso dall'acqua che verrà nuovamente iniettata nel sottosuolo o semplicemente dispersa in superficie.

Le centrali geotermoelettriche possono essere “**a contropressione**” o “**a condensazione**”. Nel primo caso, il vapore, dopo essere stato sfruttato, viene liberato in atmosfera, nell'altro è condensato e nuovamente iniettato nel sottosuolo attraverso un apposito pozzo.

In altri casi, il fluido geotermico non viene utilizzato direttamente in turbina, ma serve per vaporizzare, in uno scambiatore di calore, un secondo liquido (ad esempio l'isopentano) con una temperatura di ebollizione inferiore a quella dell'acqua. Il vapore prodotto viene poi avviato alla turbina, condensato e quindi riavviato allo scambiatore in un circuito chiuso. Il fluido geotermico, invece, viene nuovamente iniettato nel sottosuolo. Essendo un sistema a circuito chiuso è anche il più ecologico in quanto eventuali inquinanti contenuti nel fluido geotermico non vengono dispersi nell'ambiente esterno.

5.3.2 Alcuni dati

L'energia elettrica generata nel mondo per via geotermica rappresenta meno dell'1% della produzione elettrica globale.

In ogni caso, l'energia geotermica può giocare un ruolo importante nei Paesi in via di sviluppo, nei quali esiste il consumo di elettricità è ancora limitato rispetto a quello dei Paesi industrializzati e, pertanto, l'economia trae un grosso giovamento dall'utilizzo di fonti a “costo zero”.

Nel 2006, in Italia sono stati prodotti 5.527 GWh da fonte geotermica ovvero circa l'1,8% del totale. La produzione elettrica italiana di origine geotermica è attualmente inferiore rispetto all'idroelettrico, ma è superiore ad eolico e fotovoltaico.

In Italia sono attualmente operative 32 centrali geotermiche, tutte situate in Toscana nelle aree di Larderello (20 centrali, 542,5 MW_e), Travale - Radicondoli (6 centrali, 160 MW_e) e Monte Amiata (6 centrali, 88 MW_e).

Il rendimento globale della produzione di elettricità dal vapore geotermico è intorno al 10-17%, circa tre volte minore di quello delle fonti convenzionali, dovuto alla bassa temperatura del vapore geotermico in genere inferiore a 250°C.

Inoltre il vapore geotermico ha una composizione chimica che differisce dal vapore acqueo puro. In esso sono contenuti gas quali anidride carbonica (la più abbondante), idrogeno solforato, ammoniaca, metano, azoto ed idrogeno in quantità variabile (da 1 a 50 g/kg di fluido) che rappresentano una perdita di energia nel processo.

Le centrali geotermoelettriche consumano da 6 a 15 kg di vapore per kWh generato, dipendendo ciò dalla tipologia dell'impianto, a scarico diretto in atmosfera o con condensazione a valle della turbina.

Nella produzione di energia elettrica da fonte geotermica il 50% del costo è legato alla ricerca ed alla perforazione dei pozzi di produzione e di reimmissione nel sottosuolo; il costo della

perforazione dei pozzi varia da 1000 a 2000 euro per metro perforato e, di norma, occorre effettuare due perforazioni per avere almeno un pozzo produttivo. Un buon pozzo produttivo con una portata di 70.000 kg/h di vapore può alimentare una centrale da 10 MW.

In Italia, impieghi diretti dell'energia geotermica sono diffusi in diverse regioni, tra cui Emilia-Romagna, Lazio, Toscana e Veneto. La potenza totale installata al 2004 ammonta a 606,51 MWt un valore piuttosto basso se si considera l'elevata potenzialità dell'Italia, che è uno dei più ricchi al mondo in termini di risorse geotermiche. Il calore geotermico è sfruttato nel riscaldamento di quartieri cittadini e di singole abitazioni (132 MW_t), nel riscaldamento di serre (94 MW_t), in acquacoltura (92 MW_t), in processi termici industriali (10 MW_t), per il funzionamento di pompe di calore (120 MW_t) ed in balneologia (159 MW_t).

6. L'ENERGIA SOLARE

All'inizio del capitolo precedente, abbiamo già visto che il potenziale energetico dell'energia solare è enorme; in linea teorica, è pari ad oltre 6.000 volte il fabbisogno energetico mondiale. Soprattutto, però, abbiamo constatato che, da sola, la disponibilità energetica della fonte solare è di gran lunga superiore alla somma delle potenzialità di tutte le altre fonti rinnovabili.

In questo capitolo, completamente dedicato alla fonte solare, cercheremo di fornire dati più realistici circa le effettive potenzialità di tale fonte, nonché esamineremo più in dettaglio limiti, peculiarità ed opportunità degli impianti alimentati con energia solare. Questi possono essere mirati alla produzione di energia termica e/o elettrica. Nel primo caso si parla di solare termico, nell'altro occorre distinguere tra conversione diretta ed indiretta. Se l'energia luminosa è trasformata direttamente in corrente elettrica (continua), si parla di impianto fotovoltaico; diversamente, se l'energia solare serve a generare calore con cui riscaldare un fluido da far espandere in una turbina accoppiata ad un alternatore (in tal caso, si genera corrente alternata), si parla di solare termodinamico.

6.1 LE POTENZIALITÀ DELL'ENERGIA SOLARE

Quando la distanza Terra-Sole è pari al suo valore medio, la potenza raggiante incidente su una superficie di area unitaria disposta ai limiti dell'atmosfera terrestre e perpendicolarmente ai raggi solari rappresenta la costante solare G_{cs} , pari a 1.353 W/m^2 . In generale, però, la potenza raggiante G che incide su una superficie di area unitaria disposta ai limiti dell'atmosfera terrestre e perpendicolarmente ai raggi solari varia istante per istante a causa del moto di rivoluzione della Terra intorno al Sole: in un anno solare, solo in due istanti (precisamente del 3 aprile e del 22

ottobre) G coincide con G_{cs} ; tuttavia, poiché le distanze minima e massima sono abbastanza vicine in termini relativi, il rapporto G/G_{cs} , non è molto diverso dall'unità, variando tra 0,97 ed 1,04.

Approssimando la Terra ad una sfera, in prima approssimazione, è possibile ricavare che la potenza raggiante che arriva ai limiti dell'atmosfera terrestre è pari al prodotto della costante solare per la proiezione della calotta emisferica irraggiata su un piano ortogonale alla congiungente Terra-Sole. Assumendo $R_T=6.373$ km si ottiene una potenza raggiante di 172.627 TW. Al netto della riflessione e dell'assorbimento dell'atmosfera, tale valore scende a circa 91.400 TW sulla crosta terrestre. D'altronde, nelle ipotesi fatte, l'estensione superficiale di quest'ultima è pari a 510 milioni di km^2 . In definitiva, l'irraggiamento medio che, sulla terra, arriva ad altezza dei mari e delle terre emerse è circa pari a 179 W/m^2 , al lordo dell'aliquota di riflessione da parte della crosta terrestre. Al netto di tale aliquota, l'irraggiamento medio scende sensibilmente, in mare più che in terra. Sia S una porzione di crosta terrestre: ipotizziamo che S sia isoterma ed omogenea (ovvero non pizzica la curva di separazione tra mare e terra). Proviamo, ora, ad eseguire un bilancio energetico su S . In primo luogo, trascurando cosa accade all'interfaccia tra superfici marine e terrestri, occorre considerare che in presenza di gradienti di temperatura, c'è sicuramente scambio termico convettivo/conduittivo verso la parte di crosta terrestre limitrofa, nonché verso gli strati sottostanti e sovrastanti. Quindi, occorre valutare la potenza radiativa emessa da S verso l'atmosfera. Infine, bisogna tenere conto della potenza fuoriuscita da S sotto forma di vapore, di energia eolica sviluppata e dell'energia utilizzata dalle piante per i processi di fotosintesi clorofilliana. Nel caso delle ultime tre voci, possiamo anche fornire una valutazione numerica per unità di superficie: dei 91.400 TW che colpiscono la crosta terrestre, infatti, 400 servono per l'evaporazione delle acque del Pianeta, 370 si trasformano in energia eolica, 80 sono trasformati attraverso la fotosintesi clorofilliana in energia chimica. Poiché le terre emerse occupano circa $1/3$ della crosta terrestre, l'estensione superficiale della terraferma è circa pari a 170 milioni di km^2 , mentre i mari, all'altezza del pelo libero, si estendono per circa 340 milioni di km^2 . Si supponga, ora, che tutta l'acqua che evapora provenga dal solo mare, che la fotosintesi clorofilliana avvenga solo sulla terraferma e che i

venti si generino uniformemente sulla crosta di tutto il pianeta. Riportando in termini di unità di superficie, i 400, i 370 e gli 80 TW che servono rispettivamente per alimentare il ciclo delle acque, la generazione dei venti e la fotosintesi clorofilliana si ottiene:

- da ogni unità superficiale in mare fuoriescono $1,1 \text{ W/m}^2$ e $0,7$ si trasformano in energia eolica;
- da ogni unità superficiale sulla terraferma $0,7 \text{ W/m}^2$ si trasformano in energia eolica, $0,4$ sono catturati da piante, alberi ed organismi vegetali.

Cosa accade quando sulla crosta terrestre andiamo a poggiare un dispositivo di captazione della radiazione luminosa? Sicuramente, le superfici captanti sono coibentate sui lati non rivolti al Sole: le dispersioni per convezione/conduzione verso la parti limitrofe di crosta terrestre e gli strati sottostanti e sovrastanti diventano praticamente nulle. Inoltre, poiché i dispositivi di captazione sono sicuramente stati progettati per minimizzare l'aliquota di riflessione dell'energia luminosa incidente, in prima analisi possiamo pensare che tutta la potenza radiante che raggiunge la superficie captante sia assorbita. D'altronde, la presenza delle superfici di captazione impedisce alle acque di evaporare e agli organismi vegetali di portare avanti il processo di fotosintesi; al contrario, possiamo ritenere che la formazione dei venti non sia impedita dalla presenza delle superfici di captazione: infatti, ben difficilmente queste ultime riescono a modificare gli andamenti di temperatura in atmosfera ovvero i gradienti di pressione che innescano i meccanismi di generazione dei venti. In queste condizioni, i 179 W/m^2 che incidono sulla superficie di captazione ritornano in atmosfera per riemissione a meno di 1 W/m^2 che si trasforma in energia eolica e di quanto viene utilmente trasferito alle utenze a valle. In maniera più semplicistica, possiamo pensare che al dispositivo di captazione arrivino 178 W/m^2 ; di questi, una parte è riemessa verso l'atmosfera, il complemento costituisce la produzione energetica dell'impianto cui la superficie di captazione è asservita. Supponiamo, ora, che l'impianto riesca a recuperare 70 W/m^2 ovvero il 39% di 178 W/m^2 . Ricordando dal capitolo introduttivo che il fabbisogno mondiale, al lordo dei contributi delle fonti rinnovabili, è pari 10.878 Mtep/anno, per assolvere le attuali necessità energetiche del mondo

servirebbero superfici di raccolta per circa 25,6 milioni di km². Ipotizzando che i collettori siano inclinati di 30° e che gli ingombri superficiali effettivi siano pari al doppio della proiezione sull'orizzontale della superficie totale di captazione, il suolo da occupare sarebbe pari a poco meno di 15 milioni di km²; si tratta di un'estensione pari all'8,8% delle terre emerse ovvero quasi il doppio del deserto del Sahara, il più grande al mondo. Considerando che nel mondo i deserti assommano oltre 20 milioni di km², in prima approssimazione si può tranquillamente affermare che da solo il solare potrebbe tranquillamente assolvere il fabbisogno energetico mondiale.

In realtà, le cose sono più complesse. Alla base dei nostri calcoli, infatti, c'è l'ipotesi di un'irradiazione costante nel tempo ed uniforme nello spazio. Il valore di 178 W/m² è idealmente rappresentativo di una potenza unitaria disponibile in ogni istante in qualunque parte del mondo. Nella realtà, le cose sono molto diverse poiché la potenza unitaria assorbita da una superficie captante nell'arco di un anno può assumere valori compresi tra 0 e 1.000 W/m². La fonte solare, come spesso accade per le fonti rinnovabili, ha una disponibilità molto varia in funzione dell'ora del giorno, della stagione dell'anno, della latitudine, delle condizioni climatiche. L'estrema variabilità nella fornitura di energia da fonte solare costringe a prevedere idonei sistemi di accumulo per poter far fronte alla domanda di energia anche in presenza di un'irradiazione insufficiente o nulla. Il sistema di accumulo, infatti, si carica di energia quando c'è un surplus di produzione, si scarica quando c'è un eccesso di domanda. Purtroppo, però, l'accumulo di energia termica e/o elettrica è dispendioso da un punto di vista energetico; pertanto, occorrerebbe sovradimensionare la capacità produttiva almeno per sostenere i costi energetici dell'accumulo. D'altronde, tanto maggiore è la capacità del sistema di accumulo, tanto minore è il rischio di rimanere senza disponibilità energetica; di contro, però, ad ogni incremento della capacità del sistema di accumulo aumenta l'energia non impiegabile per mancanza di domanda e, dunque, sprecata. In ogni caso, in un caso reale gli ingombri superficiali di un sistema energetico mondiale basato sulla fonte solare sarebbero sensibilmente maggiori dei 15 milioni di km² precedentemente calcolati.

Inoltre, localizzando gli impianti solari nei deserti, verosimilmente si allontanerebbe la produzione dai centri di consumo ovvero si paleserebbe l'esigenza di dover trasportare su lunghe distanze l'energia generata. Sicuramente ciò è possibile per l'energia elettrica, ma non certo per l'energia termica. Dunque, nei deserti potrebbero essere localizzati solamente impianti di produzione elettrica. Infatti, a prezzo di ingenti investimenti per la realizzazione di elettrodotti in alta tensione, è teoricamente possibile far arrivare l'energia elettrica nei luoghi di utilizzo. Naturalmente, non mancherebbero difficoltà tecniche di tutto rilievo. Per esempio in rete deve viaggiare corrente alternata. Dunque, procedendo con impianti fotovoltaici sarebbe necessario costruire inverter di opportuna taglia e numero per trasformare la corrente continua in alternata; diversamente, occorrerebbe ricorrere al solare termodinamico, ma in questo caso bisognerebbe risolvere il problema dei transitori visto che gli impianti a vapore sono poco flessibili in termini di regolazione. In ogni caso, occorrerebbe incrementare ulteriormente la capacità produttiva per sostenere anche i costi del trasporto dell'energia elettrica ovvero aumenterebbero ancora gli ingombri superficiali.

In ultimo, non si deve trascurare il costo energetico da sostenere per la realizzazioni di impianti ed infrastrutture nel deserto: occorrerebbe creare tutto dal niente, in luoghi climaticamente ostili, spesso molto lontani dalle culle della civiltà. C'è da chiedersi: i costi energetici di installazione rappresentano quale percentuale della produzione generata dagli impianti nell'arco di vita media? Con un EROEI (Energy Return On Energy Investment) troppo basso, energeticamente parlando, il gioco potrebbe non valere la candela.

Insomma, nonostante un potenziale energetico teoricamente immenso, non meraviglia che finora il solare non sia riuscito a decollare. Le difficoltà tecniche sono tante, i costi di investimento sono elevatissimi, i ritorni finanziari sono subordinati all'esistenza ed alla disponibilità di contributi pubblici. Pur tuttavia, al momento il solare rappresenta l'unica alternativa alle fonti non rinnovabili che sia veramente pulita e praticabile su scala globale. Ed è proprio per questo che occorre spingere

moltissimo sulla ricerca per cercare di superare tutti gli attuali limiti che ne impediscono la diffusione e che vedremo più approfonditamente nei paragrafi successivi.

6.2 IL SOLARE TERMICO

Nelle tecnologie legate al solare termico l'energia radiante è utilizzata per produrre calore grazie ad opportuni materiali che, irraggiati dalla luce, aumentano più di altri la loro temperatura, assorbendo quasi completamente l'energia associata alla radiazione. In questo genere di impianti, il calore ottenuto è utilizzato direttamente in applicazioni “ a bassa temperatura”, come la produzione di acqua calda per uso domestico, il riscaldamento di ambienti, il riscaldamento di piscine, la produzione di calore per processi industriali o agro-alimentari.

Un impianto solare termico è normalmente composto da un pannello che riceve l'energia solare, da uno scambiatore dove circola il fluido utilizzato per trasferirla al serbatoio utilizzato per immagazzinare l'energia accumulata. Il sistema può avere una circolazione naturale o forzata.

Nel caso della circolazione naturale, per far circolare il fluido vettore nel sistema solare, si sfrutta la convezione. Il liquido vettore riscaldandosi nel pannello solare si dilata e diminuisce la propria densità; a causa del gradiente di densità tende a galleggiare rispetto al fluido più freddo in procinto di entrare e così si sposta verso uno scambiatore posto nella parte alta del serbatoio di accumulo; all'interno del circuito primario dello scambiatore, il fluido (caldo) in uscita dal pannello cede il calore acquisito all'acqua sanitaria (fredda) che circola nel circuito secondario. Questa tipologia è più semplice ed economica di quella a circolazione forzata. Non esiste consumo elettrico dovuto alla pompa di circolazione e alla centralina solare differenziale presente nel sistema a circolazione forzata. In generale, il fluido vettore usato nel circuito primario è glicole-propilenico (atossico) miscelato con acqua in una percentuale tale da garantire una adeguata resistenza al gelo.

Il serbatoio viene disposto ad un'altezza maggiore di quella dei pannelli solari a cui è collegato e per ragioni estetiche è del tipo orizzontale ad intercapedine. La disposizione più funzionale sarebbe verticale per favorire la stratificazione del calore accumulato ma sarebbe decisamente antiestetica. La circolazione naturale, rispetto a quella forzata, risulta essere più sensibile alle perdite di carico del circuito primario e vengono, quindi, realizzati sistemi compatti ove il serbatoio di accumulo è sito molto vicino al pannello solare. Il serbatoio di accumulo coibentato è posto all'esterno e si ha comunque una inevitabile dispersione termica del calore raccolto ed è poco adottato in regioni fredde e nevose quali quelle montane. Un impianto a circolazione naturale con serbatoio esterno è adatto in regioni con temperature notturne non rigide. Attualmente viene fatta molta attenzione all'impatto visivo di tali sistemi colorando i serbatoi di color tegola oppure disponendoli direttamente a terra.

Negli impianti a circolazione forzata, il fluido si sposta, con l'aiuto di pompe, solo quando nei pannelli il fluido vettore si trova ad una temperatura più elevata rispetto a quella dell'acqua contenuta nei serbatoi di accumulo. Per regolare la circolazione ci si avvale di sensori che confrontano la temperatura del fluido vettore nel collettore con quella nel serbatoio di accumulo. In tali impianti ci sono meno vincoli per l'ubicazione dei serbatoi di accumulo. La maggiore velocità del fluido vettore permette un maggiore scambio termico e quindi il rendimento del pannello è leggermente superiore, anche perché si possono utilizzare proficuamente tecnologie e materiali il cui costo non sarebbe giustificato in un impianto a circolazione naturale per i motivi sopra descritti. Normalmente, il circuito idraulico collegato al pannello è chiuso e separato da quello dell'acqua che riscalda, posizionando una serpentina nel serbatoio come scambiatore di calore. Le serpentine possono anche essere due nel caso si voglia anche preriscaldare il fluido dell'impianto di riscaldamento tramite l'acqua del serbatoio. Si può anche integrare una resistenza elettrica per riscaldare l'acqua in caso di insufficiente o assente (nelle ore notturne) irradiazione solare.

In figura 6.1 è riportato uno schema tipico di un impianto a circolazione forzata, dove distinguiamo:

- 1) il pannello solare;
- 2) il regolatore;
- 3) la pompa;
- 4) il pressostato
- 5) il serbatoio dell'acqua
- 6) il sistema di generazione termica ausiliario (caldaia, pompa di calore ecc.)

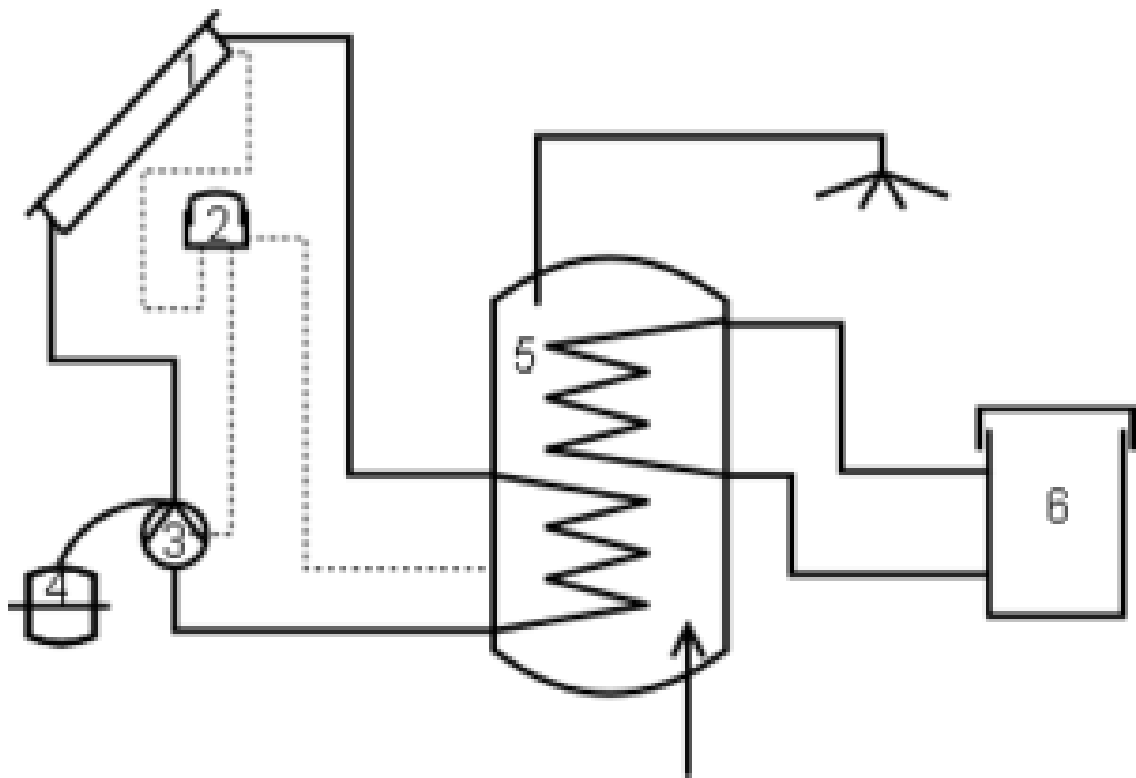


Figura 6.1 – Schema tipico di impianto a circolazione forzata

I dispositivi di captazione più diffusi sono i collettori solari piani e quelli a concentrazione.

6.2.1 I collettori solari piani

Il collettore piano è il sistema più utilizzato per ottenere acqua calda a bassa temperatura, cioè compresa fra i 50 °C e i 90 °C. Un collettore piano è costituito da:

- una lastra trasparente di vetro, che fa passare le radiazioni in arrivo e blocca quelle in uscita;
- una piastra di rame (o di altro materiale conduttore), al cui interno sono presenti i canali, dove circola il fluido a cui è trasferito il calore ricavato dalla radiazione solare;
- uno strato coibente, per eliminare le dispersioni attraverso i lati non rivolti al Sole.

I pannelli solari piani possono essere senza o con vetro di chiusura.

I pannelli solari piani non vetrati hanno il vantaggio di essere poco costosi e di avere un ottimo rendimento in condizioni ottimali di irraggiamento quando la temperatura esterna è alta. A causa della mancanza dell'isolamento il loro rendimento diminuisce rapidamente all'allontanarsi dalle condizioni ottimali. Essendo utilizzabili essenzialmente per la produzione di acqua calda sanitaria ad uso stagionale, sono spesso impiegati nel riscaldamento delle piscine.

I pannelli solari vetrati hanno una struttura attorno all'assorbitore che ne limita le dispersioni sul lato rivolto al Sole. Hanno un rendimento leggermente inferiore ai non vetrati in condizioni ottimali ma in condizioni meno favorevoli hanno un rendimento decisamente più alto riuscendo a produrre acqua calda per uso sanitario da marzo fino a ottobre.

I pannelli solari possono anche essere sottovuoto: in tal caso, riescono a garantire un maggiore apporto energetico anche in condizioni di basso irraggiamento o basse temperature esterne. In virtù di ciò, il campo di applicazioni è molto eterogeneo (produzione di acqua sanitaria, integrazione agli impianti di riscaldamento, riscaldamento piscine ed altro).

Solitamente, i pannelli solari termici vengono installati in posizione fissa, se possibile orientati verso sud, in modo da ricevere la massima quantità di radiazioni. Un metro quadrato di

collettore solare può scaldare da 40 a 300 litri di acqua al giorno fino a 45-60 gradi centigradi. L'efficienza varia a seconda delle condizioni climatiche e della tipologia del collettore dal 30% all'80%. Il rendimento dei pannelli solari è aumentato negli ultimi dieci anni di circa il 30%.

6.2.2 I collettori solari a concentrazione

I collettori a concentrazione sono pannelli solari termici che utilizzano un sistema di specchi che riflette i raggi del Sole facendoli convergere su un ricevitore. I collettori possono essere di tipo lineare, quando concentrano i raggi del Sole sul segmento di una retta, o possono concentrare i raggi in un punto, riscaldando il fluido in uscita dal pannello a temperature superiori ai 100 gradi centigradi.

6.2.3 Gli obblighi per gli edifici di nuova costruzione o ristrutturati integralmente

Il decreto legislativo 311/06 contiene *“disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 192/05, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico degli edifici”*. Con l'entrata in vigore del decreto legislativo 311/06, è divenuto obbligatorio l'utilizzo di fonti rinnovabili per la produzione di energia termica ed elettrica già nell'attuale fase di regime transitorio per la prestazione energetica degli edifici. In attesa che entro il 31 dicembre 2008, le Regioni, le Province autonome di Trento e Bolzano in accordo con gli enti locali predispongano un programma di sensibilizzazione e riqualificazione energetica del parco immobiliare territoriale, già oggi è obbligatorio che *“nel caso di edifici di nuova costruzione o in occasione di nuova installazione di impianti termici o di ristrutturazione degli impianti termici esistenti, l'impianto di produzione di energia termica deve essere progettato e realizzato in modo*

da coprire almeno il 50% del fabbisogno annuo di energia primaria richiesta per la produzione di acqua calda sanitaria con l'utilizzo delle predette fonti di energia. Tale limite è ridotto al 20% per gli edifici situati nei centri storici".

Si tratta, invero, di una novità formidabile che potrebbe portare a rivedere completamente i criteri di progettazione degli impianti termici per uso residenziale. Da qualche anno, le preferenze degli Italiani sono tutte rivolte a piccoli impianti di produzione autonoma del calore. Negli edifici di nuova costruzione è piuttosto raro che siano costruiti impianti per la produzione centralizzata dell'energia termica ed, in generale, vi è la tendenza a dismettere quelli esistenti. Da un punto di vista energetico, però, sarebbe opportuno fare un passo indietro. E' noto, infatti, che a parità di energia resa all'utenza, un grosso impianto di generazione termica consuma meno energia primaria di tante piccole caldaiette che, insieme, assommano la stessa potenza totale. In più, la non contemporaneità dei consumi consente, in base a considerazioni statistiche, di sostituire tante piccole caldaiette con un'unica centrale di potenza inferiore alla somma delle potenze dei singoli generatori con ulteriori vantaggi economici. Ora, l'obbligo di generare almeno il 50% del fabbisogno annuo di energia primaria attraverso la fonte solare sicuramente impone di rivalutare soluzioni centralizzate di energia primaria. Infatti, un impianto solare termico centralizzato può essere messo facilmente in parallelo con una caldaia centralizzata, mentre non è così semplice farlo con tanti piccoli impianti autonomi. Nel primo caso, infatti, si potrebbe facilmente tornare al buon vecchio sistema di ripartire i costi del combustibile consumato tra i condomini in funzione dell'estensione delle singole unità immobiliari ovvero dei millesimi condominiali; più complesso è il discorso di gestire una soluzione mista in quanto bisognerebbe procedere alla contabilizzazione dell'energia fornita per distinguere la fonte dell'energia termica consumata. Invero, procedere alla contabilizzazione dell'energia non è cosa proibitiva, ma, in ogni caso, comporta un maggior livello di complessità logica. D'altronde, si può pensare di mettere in parallelo impianti autonomi solari e tradizionali; in questo caso, però, emergerebbero penalizzazioni in termini di energia primaria consumata. A parità di taglia complessiva, tanti piccoli sistemi di accumulo in luogo di uno solo più

grande disperdono verso l'ambiente esterno più energia a causa di un meno favorevole rapporto tra superficie disperdente e volume di accumulo. Inoltre, nel caso di soluzione centralizzata sarebbe possibile installare un impianto di potenza inferiore alla somma delle potenze singole. Riuscendo così a conseguire un ulteriore beneficio economico. Insomma, l'obbligo di sfruttare le fonti rinnovabili in campo civile potrebbe finalmente consentire il tramonto di soluzioni energetiche illogiche ed imporre criteri progettuali più razionali.

6.2.4 Le agevolazioni fiscali relative agli edifici esistenti

La legge 296/07 (alias "*Finanziaria 2007*"), contenete "*Disposizioni per la formazione del bilancio annuale e pluriennale dello Stato*", pubblicata sul Supplemento Ordinario della Gazzetta Ufficiale, dispone interessanti incentivi per il risparmio. In particolare, al comma 346, è prevista una detrazione fiscale del 55% relativamente alle spese sostenute per l'installazione di pannelli solari per la produzione di acqua calda.

Il suddetto comma, infatti, recita: "*Per le spese documentate, sostenute entro il 31 dicembre 2007, relative all' installazione di pannelli solari per la produzione di acqua calda per usi domestici o industriali e per la copertura del fabbisogno di acqua calda in piscine, strutture sportive, case di ricovero e cura, istituti scolastici e università, spetta una detrazione dall'imposta lorda per una quota pari al 55 per cento degli importi rimasti a carico del contribuente, fino a un valore massimo della detrazione di 60.000 euro, da ripartire in tre quote annuali di pari importo*".

Al di là delle modifiche introdotte dal successivo decreto legislativo 311/06, si tratta di un'agevolazione fiscale particolarmente interessante che consente di recuperare in tre anni il 55% delle spese sostenute per la realizzazione di impianti fino a 109.091,00 euro. Le spese sopra questo limite non beneficino di detrazione e, conseguentemente, l'agevolazione diventa percentualmente meno rilevante. In assenza di altri tipi di detrazione, per godere del massimo beneficio fiscale, con

le aliquote fiscali attualmente in vigore, le persone fisiche devono avere un reddito non inferiore 61.780,00 euro; ovviamente, in presenza di altri tipi di detrazione, per massimizzare il beneficio fiscale occorrono redditi ancora più elevati.

Al comma 348 sono riportati i criteri cui deve essere subordinata la concessione del beneficio fiscale. Il suddetto comma, infatti, spiega che: *“La detrazione fiscale di cui al comma 344, 345, 346 e 347 e' concessa con le modalità di cui all'articolo 1 della legge 27 dicembre 1997, n. 449, e successive modificazioni, e alle relative norme di attuazione previste dal regolamento di cui al decreto del Ministro delle finanze 18 febbraio 1998, n. 41, e successive modificazioni, sempre che siano rispettate le seguenti ulteriori condizioni:*

a) *la rispondenza dell'intervento ai previsti requisiti e' asseverata da un tecnico abilitato, che risponde civilmente e penalmente dell'asseverazione;*

b) *il contribuente acquisisce la certificazione energetica dell'edificio, di cui all'articolo 6 del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, qualora introdotta dalla regione o dall'ente locale, ovvero, negli altri casi, un "attestato di qualificazione energetica", predisposto ed asseverato da un professionista abilitato, nel quale sono riportati i fabbisogni di energia primaria di calcolo, o dell'unita' immobiliare ed i corrispondenti valori massimi ammissibili fissati dalla normativa in vigore per il caso specifico o, ove non siano fissati tali limiti, per un identico edificio di nuova costruzione. L'attestato di qualificazione energetica comprende anche l'indicazione di possibili interventi migliorativi delle prestazioni energetiche dell'edificio o dell'unità immobiliare, a seguito della loro eventuale realizzazione. Le spese per la certificazione energetica, ovvero per l'attestato di qualificazione energetica, rientrano negli importi detraibili.*

In ogni caso, tutte le modalità di attuazione per la concessione del beneficio fiscale sono riportate nel Decreto del Ministero dell'Economia e delle Finanze del 19/02/2007 (il cosiddetto Decreto Edifici) che riporta le *“disposizioni in materia di detrazioni per le spese di riqualificazione*

energetica del patrimonio edilizio esistente, ai sensi dell'articolo 1, comma 349, della legge 27 dicembre 2006, n. 296”.

6.3 IL FOTOVOLTAICO

Gli impianti fotovoltaici sono in grado di trasformare, direttamente ed istantaneamente, l'energia. Tali sistemi sfruttano l'effetto fotovoltaico, che si realizza quando un elettrone presente nella banda di valenza di un materiale, generalmente semiconduttore, passa alla banda di conduzione a causa dell'assorbimento di un fotone sufficientemente energetico incidente sul materiale.

Una cella fotovoltaica è costituita da un sottile strato di materiale semiconduttore. In genere il materiale semiconduttore che costituisce la cella è silicio; in tal caso, viene drogato mediante l'inserimento su una faccia di atomi di boro (drogaggio “p”) e sull'altra di piccole quantità di fosforo (drogaggio “n”). Nella zona di contatto tra i due strati a diverso drogaggio si determina un campo elettrico, per cui, esponendo alla luce la cella, per effetto fotovoltaico, si generano delle cariche elettriche; collegando ad un utilizzatore le due facce della cella, si raccoglie così una corrente elettrica continua.

Una cella fotovoltaica di dimensioni 100x100 mm, sottoposta ad un'irradiazione di 1.000 W/m² alla temperatura di 25 °C fornisce una corrente di 3 A, una tensione di 0,5 V ed una potenza di 1,5 W. Poiché la tensione restituita da una singola cella fotovoltaica è troppo bassa per le comuni applicazioni, occorre connettere più celle in serie, realizzando così un modulo o pannello fotovoltaico in grado di generare energia elettrica con livello di tensione sfruttabile dalle comuni applicazioni.

Un generatore fotovoltaico è un insieme di moduli collegati in serie ed in parallelo in modo da ottenere i valori di tensione e potenza desiderati. Mettendo in serie più moduli si eleva la tensione fino al valore desiderato, ottenendo una stringa; più stringhe in parallelo consentono di elevare la potenza installata. Un modulo in genere è composto da 36 celle, occupa circa $0,5 \text{ m}^2$, può fornire fino a 50 W e produce circa 0,5-0,6 kWh/giorno alla latitudine di Napoli. La potenza di un pannello fotovoltaico in condizioni standard si misura in Watt di picco: un impianto da 1 kWp è in grado di erogare una potenza elettrica di 1 kW quando è esposto ad una irradiazione di 1.000 W/m^2 , con temperatura dei moduli pari 25°C ed una massa di aria pari a 1,5.

Il silicio solitamente utilizzato nelle celle fotovoltaiche può essere impiegato in forma mono-cristallina, policristallina e amorfa.

Il silicio monocristallino è ottenuto per crescita di silicio fuso da un unico cristallo; le celle ottenute con questo metodo arrivano ad avere un'efficienza di circa il 17%.

Il silicio policristallino è ottenuto da più cristalli e le celle da esso derivate hanno un'efficienza di circa il 13%.

Il silicio amorfo non presenta struttura cristallina; le celle realizzate con questo materiale, a fronte di un minor costo di produzione, offrono un rendimento più modesto intorno all'8%.

Gli impianti fotovoltaici sono generalmente suddivisi in due grandi famiglie: impianti ad isola, o stand-alone, e impianti connessi alla rete, o grid-connected.

E' possibile fornire alcune indicazioni di massima della capacità produttiva di un impianto fotovoltaico: nella tabella 6.1 sono riportati i kWh elettrici generati da un campo fotovoltaico da 1 kWp, distinguendo tra pannelli con silicio mono o policristallino e prevedendo tre diverse localizzazioni dell'impianto.

Localizzazione dell'impianto	Produttività con silicio monocristallino [kWh/m ² anno]	Produttività con silicio policristallino [kWh/m ² anno]
NORD	150	130
CENTRO	190	160
SUD	210	180

Tabella 6.1

6.3.1 Gli impianti fotovoltaici ad isola

Questa famiglia identifica utenze elettriche completamente autosufficienti che si riforniscono da un impianto fotovoltaico elettricamente isolato. I principali componenti di un impianto fotovoltaico ad isola sono generalmente:

- il campo dei pannelli fotovoltaici
- un regolatore di carica deputato a stabilizzare l'energia raccolta e a gestirla all'interno del sistema;
- il sistema di accumulo, costituito da batterie che si caricano quando è disponibile la fonte solare e si scaricano in assenza di Sole.

Nel caso di utenza isolata, tutti i carichi elettrici (ivi compreso un eventuale inverter per utilizzi in corrente alternata) sono direttamente connessi al regolatore di carica, che funge da vero e proprio supervisore di sistema.

Il campo fotovoltaico impiegato negli impianti ad isola è solitamente ottimizzato per uno specifico voltaggio di sistema, opportunamente individuato in fase di progettazione. I voltaggi più utilizzati sono 12, 24 o più raramente 48 V. Conseguentemente, essendo la maggior parte dei

moduli fotovoltaici in commercio a 12 o 24 V, le stringhe elettriche che formano il campo sono molto corte, fino al limite del singolo modulo per stringa. In quest'ultimo caso, in pratica, il campo fotovoltaico è costituito da semplici paralleli elettrici tra moduli, occasionalmente dotati di diodi.

Il regolatore di carica usualmente svolge le seguenti funzioni:

- provvede a staccare il campo fotovoltaico dalle batterie in caso di uscita elettrica con voltaggio troppo basso, come ad esempio dopo il tramonto;
- si occupa di staccare il sistema di accumulo quando è completamente caricato;
- stacca i carichi elettrici a batteria scarica.

L'accumulatore è in genere costituito da monoblocchi o elementi singoli specificamente progettati per cicli di carica/scarica anche rapidi. Non sono in genere impiegati accumulatori per uso automobilistico che, pur funzionando a dovere, vengono rapidamente esauriti nelle prestazioni a causa della gravosità di questo impiego.

6.3.2 Gli impianti fotovoltaici connessi alla rete

Questa famiglia identifica quelle utenze elettriche già servite dalla rete nazionale in AC, ma che iniettano in rete la produzione elettrica risultante dal loro impianto fotovoltaico, opportunamente convertita in corrente alternata e sincronizzata a quella della rete.

I principali componenti di un impianto fotovoltaico connesso alla rete sono:

- il campo dei pannelli fotovoltaici;
- l'inverter che provvede a stabilizzare, convertire in alternata ed immettere in rete la corrente elettrica generata;
- un quadro di protezione e controllo tra inverter e rete.

I vari gestori di rete sono obbligati dalla vigente normativa italiana a fornire il servizio di contabilizzazione dell'energia elettrica in ingresso ed in uscita. Il servizio è gratuito, fatte salve le

spese di gestione, che solitamente consistono in un canone annuo di locazione di un contatore piombabile, dedicato esclusivamente alla misurazione dell'energia elettrica diretta in rete.

6.3.3 Gli incentivi in “conto energia”

In Italia, l’obiettivo nazionale di potenza nominale fotovoltaica cumulata da installare è stabilito in 3000 MW entro il 2016. L’obiettivo è ambizioso e, così, è stato deciso di riconoscere contributi incentivanti alle persone fisiche e giuridiche, ai soggetti pubblici ed ai condomini di unità abitative e/o di edifici che scelgono di produrre energia elettrica con tecnologia fotovoltaica. Poiché gli incentivi sono conteggiati sulla base dell’energia elettrica generata è usuale parlare di contributi in “conto energia”. L’entità del contributo varia in funzione della potenza e della tipologia d’impianto. In tabella 6.2 sono riportati i contributi, espressi in euro, riconosciuti per ciascun kWh elettrico prodotto da impianti fotovoltaici messi in esercizio entro il 31 dicembre 2008. Il contributo è riconosciuto per un periodo di venti anni a decorrere dalla data di entrata in esercizio dell’impianto ed è costante in moneta corrente in tutto il periodo di venti anni.

	Potenza nominale dell'impianto [kW]	Impianti fotovoltaici non integrati	Impianti fotovoltaici parzialmente integrati	Impianti fotovoltaici con integrazione architettonica
A)	$1 \leq P \leq 3$	0,40	0,44	0,49
B)	$3 < P \leq 20$	0,38	0,42	0,46
C)	$P > 20$	0,36	0,40	0,44

Tabella 6.2

Per il conteggio degli incentivi di cui sopra occorre fare riferimento all'energia elettrica misurata all'uscita del gruppo di conversione della corrente continua in corrente alternata, ivi incluso l'eventuale trasformatore, prima che essa sia resa disponibile alle utenze elettriche del soggetto responsabile e/o immessa nella rete elettrica.

Per quanto riguarda la tipologia di impianto, in generale, occorre distinguere:

- negli impianti non integrati, i moduli fotovoltaici sono essenzialmente ubicati al suolo;
- negli impianti parzialmente integrati, i moduli fotovoltaici sono installati su tetti piani e terrazze di edifici oppure su coperture, barriere acustiche, pensiline, pergole, tettoie facciate, balaustre, parapetti di edifici in modo complanare alla superficie di appoggio e senza la sostituzione dei materiali che costituiscono le superfici d'appoggio stesse;
- negli impianti fotovoltaici con integrazione architettonica, i moduli fotovoltaici devono essere posti:
 - in sostituzione di materiale di rivestimento di tetti, coperture, facciate di edifici e fabbricati mantenendo l'inclinazione e la funzionalità architettonica della superfici rivestite;
 - su pensiline, pergole e tettoie in cui la struttura di copertura sia costituita dai moduli fotovoltaici e dai relativi sistemi di supporto;
 - su porzioni della copertura di edifici in cui i moduli fotovoltaici sostituiscono il materiale trasparente o semitrasparente atto a permettere l'illuminamento naturale di uno o più vani interni;
 - su barriere acustiche in cui parte dei pannelli fonoassorbenti siano sostituiti da moduli fotovoltaici
 - su elementi di illuminazione in cui la superficie esposta alla radiazione solare degli elementi riflettenti sia costituita da moduli fotovoltaici;
 - su strutture frangisole i cui elementi strutturali siano costituiti dai moduli fotovoltaici e dai relativi sistemi di supporto;

- su balaustre e parapetti in cui i moduli fotovoltaici sostituiscano gli elementi di rivestimento e copertura;
- su finestre in cui i moduli fotovoltaici sostituiscano o integrino le superfici vetrate delle finestre stesse;
- su persiane in cui i moduli fotovoltaici costituiscano gli elementi strutturali delle persiane
- su qualsiasi superficie descritta nelle tipologie precedenti sulla quale i moduli fotovoltaici costituiscano rivestimento o copertura aderente alla superficie stessa.

Gli impianti messi in esercizio dopo il 31 dicembre 2008 beneficeranno di contributi di più modesta entità. A partire dal 1 gennaio 2009, per ogni kWh elettrico generato da fonte voltaica sarà riconosciuto un importo decurtato, rispetto alla situazione attuale, del 2% per ogni anno intercorso dal 2008 fino all'anno di immissione in esercizio, fermo restando il periodo di venti anni.

Un'ulteriore maggiorazione nella misura del 5% del contributo è riconosciuta nei seguenti casi:

- impianti di potenza superiore ai 3 kW la cui produzione è integralmente destinata all'autoconsumo;
- impianti il cui soggetto responsabile è una scuola pubblica o paritaria di qualunque ordine e grado o una struttura sanitaria pubblica;
- impianti integrati in superfici esterne degli involucri di edifici, fabbricati, strutture edilizie di destinazione agricola, in sostituzione di coperture in eternit o comunque contenenti amianto;
- per gli impianti i cui soggetti pubblici sono enti locali con popolazione residente inferiore a 5000 abitanti sulla base dell'ultimo censimento Istat.

Gli impianti fotovoltaici devono essere collegati alla rete elettrica o a piccole reti isolate. Ogni singolo impianto fotovoltaico dovrà essere caratterizzato da un unico punto di connessione alla rete elettrica, non condiviso con altri impianti fotovoltaici.

L'energia elettrica prodotta da impianti fotovoltaici di potenza nominale non superiore a 20 kW può beneficiare della disciplina dello scambio sul posto. Tale disciplina continua ad applicarsi anche dopo il termine del periodo di diritto al contributo incentivante. In alternativa, l'energia elettrica prodotta da impianti fotovoltaici che non beneficiano della disciplina dello scambio sul posto, qualora immessa nella rete elettrica, è ritirata con le modalità e alle condizioni fissate dall'Autorità per l'energia elettrica e il gas ai sensi dell'art. 13, comma 3, del decreto legislativo 29 dicembre 2003, n. 387, ovvero ceduta sul mercato.

6.3.4 Le opportunità del “conto energia”

I contributi in “conto energia” sono molto interessanti perché consentono di investire con profitto in una tecnologia altrimenti poco competitiva sotto il profilo economico. Le opportunità sono di due tipi: finanziaria ed energetica. Esaminiamole in modo più dettagliato.

Il conto energia può rivelarsi interessante anche per chi vuole fare semplicemente un investimento finanziario. Supponiamo che un soggetto abbia a disposizione una piazzola, un cortile, un terreno, più in generale uno spazio aperto improduttivo e ben soleggiato. Costui, oggi, può metterlo a reddito installando un impianto fotovoltaico, perfino se lo spazio in questione è privo di utenze elettriche. In questo caso, infatti, si può cedere la produzione all'Acquirente Unico, una società per azioni costituita dal GRTN a cui è affidato il compito di assicurare la fornitura di energia elettrica ai clienti vincolati (ovvero coloro che possono stipulare contratti di fornitura di energia esclusivamente con il distributore che esercita il servizio nell'area territoriale in cui detto cliente è localizzato). Il compito dell'Acquirente Unico è quello di acquistare energia elettrica alle condizioni

più favorevoli sul mercato e di cederla alle imprese distributrici per la fornitura ai clienti vincolati. Attualmente il valore riconosciuto per il ritiro dell'energia elettrica prodotta da fonte rinnovabile è poco superiore a 0,08 €/kWh. Naturalmente, oltre a quanto riconosciuto dall'Acquirente Unico per il ritiro dell'energia prodotta, chi gestisce un impianto fotovoltaico ha diritto ai contributi in conto energia.

Quanto costa un impianto fotovoltaico? I costi di installazione dipendono principalmente dal prezzo dei singoli moduli fotovoltaici, in misura minore da ubicazione e tipologia di impianto (non integrato, parzialmente integrato, con integrazione architettonica). Facendo riferimento a pannelli di ultima generazione (che utilizzano silicio monocristallino come semiconduttore), per installare un impianto fotovoltaico occorrono circa 5.000-7.000 euro/kWp, dove, naturalmente, i valori più bassi sono relativi ad impianti di grossa taglia che riescono a beneficiare di migliori economie di scala. Con pannelli fotovoltaici di ultima generazione, alle latitudini dell'Italia Meridionale, all'inizio dell'esercizio, è possibile produrre 1.400-1.500 kWh/kWp; per tenere conto di un progressivo decadimento delle prestazioni nel tempo, è ragionevole ipotizzare che le prestazioni decadano linearmente nel tempo e che, dopo 25 anni, l'impianto produca ancora l'80% dell'energia generata da nuovo.

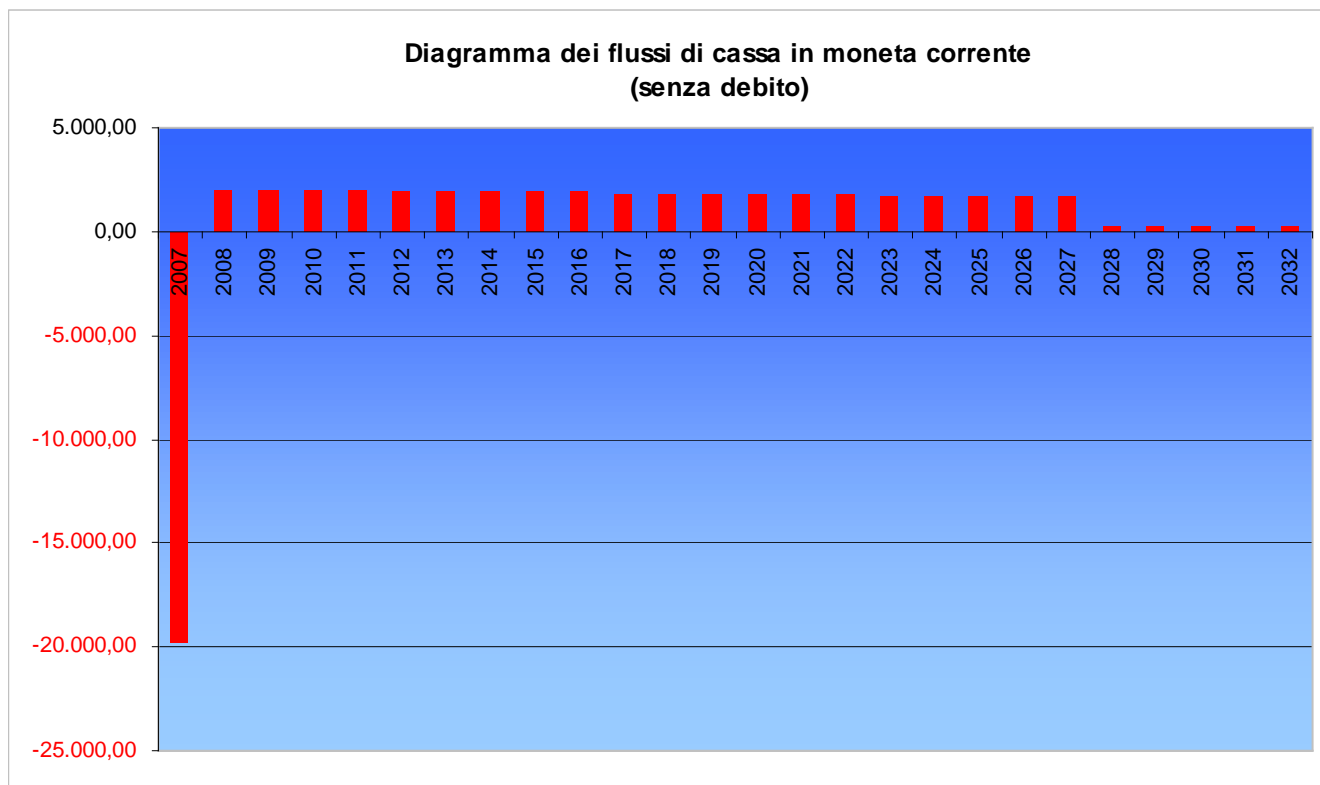
Supponiamo che il soggetto, oltre alla disponibilità di spazio, abbia anche capitale da investire. Allora, occorre valutare se sia più conveniente impiegare il capitale per finanziare la realizzazione di un impianto fotovoltaico (investimento "alternativo") piuttosto che puntare su tradizionali obbligazioni (investimento "certo"). La risposta, naturalmente, non è univoca; però, nel caso in questione, estremamente semplice, è sufficiente esaminare il costo di installazione dei moduli fotovoltaici ed il rendimento dell'investimento "certo", per esempio un bel BTP con vita residua di 25 anni. Assumendo che, in entrambi i casi, ogni disponibilità liquida generata nell'arco di tempo considerato sia stata reinvestita con una remunerazione in linea con il tasso dell'investimento "certo", che la potenza dell'impianto sia 3 kWp ovvero piccola, che i pannelli siano non integrati, che tutta la produzione sia ceduta all'Acquirente Unico in cambio di 0,08

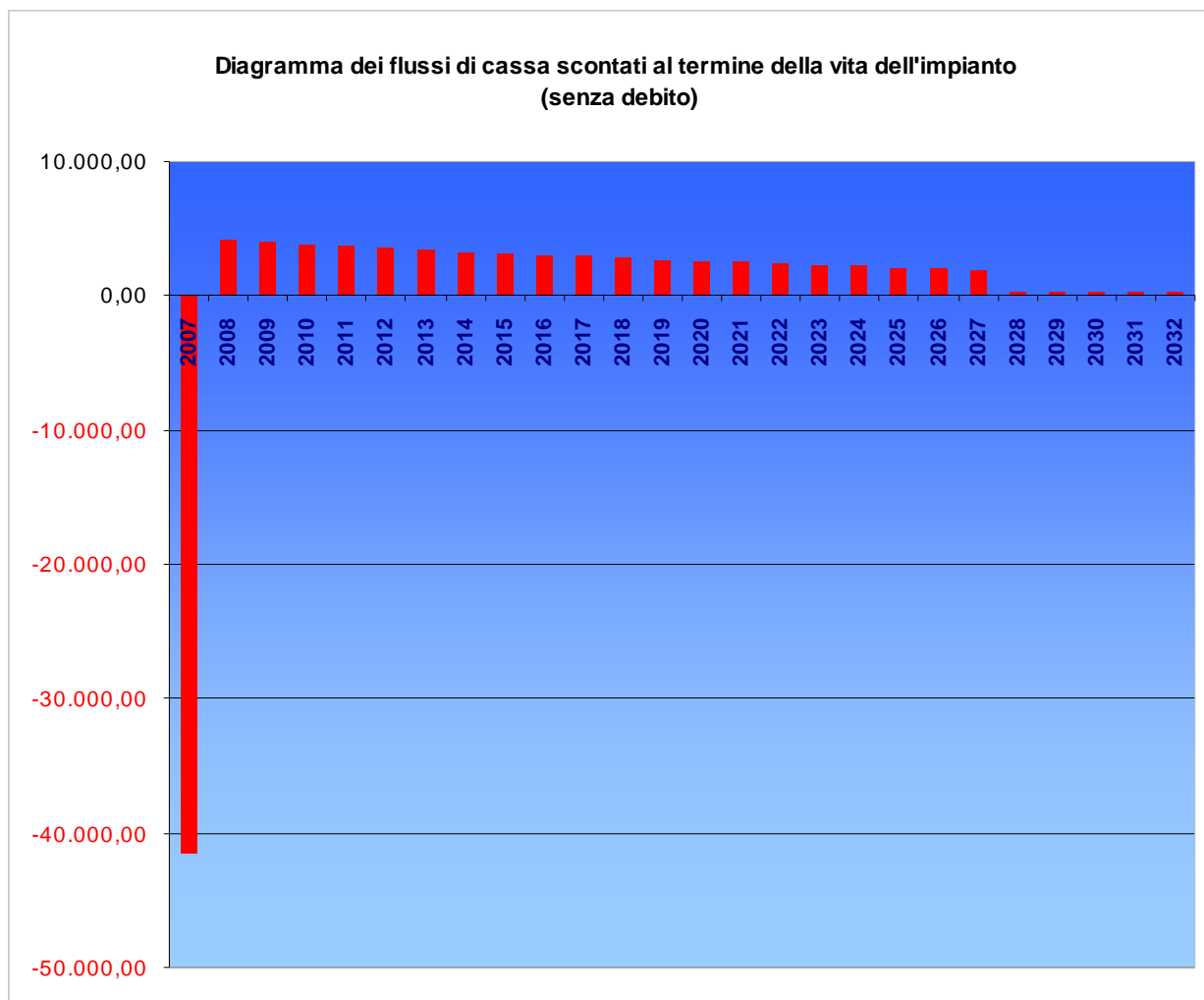
€/kWh, si ottengono i differenziali riportati in tabella 6.3 ed espressi in termini di rendimento alternativo meno quello certo.

Costo pannelli [Euro/kWp]	Redditività investimento certo				
	3,00%	4,00%	5,00%	6,00%	7,00%
6.600	1,52%	1,15%	0,80%	0,45%	0,12%
6.800	1,40%	1,03%	0,67%	0,32%	-0,01%
7.000	1,27%	0,91%	0,55%	0,20%	-0,14%

Tabella 6.3

Di seguito si riportano i flussi di cassa in moneta corrente ed attualizzati al termine di vita dell'impianto.





Al di là di ovvie considerazioni circa l'influenza del costo dei pannelli fotovoltaici, analizzando la tabella 6.3, emerge immediatamente che il differenziale è tanto maggiore quanto più basso è il livello di redditività dell'investimento certo. Dunque, sicuramente in condizioni di inflazione scarsa, investire nell'ipotesi alternativa consente di avere un extra rendimento interessante.

Le cose sono sensibilmente più complesse dovendo o volendo far ricorso a capitale di terzi. In questo caso, oltre al costo dei pannelli ed alla redditività dell'investimento "certo", occorre considerare gli interessi passivi, nonché l'entità e la tipologia del finanziamento. In tabella 6.4 sono riportati i differenziali di rendimento ancora nell'ipotesi di un impianto da 3 kWp, costo di acquisto pari a 7.000 €/kWp, tasso di interesse passivo i_p pari al 6%, rimborso del finanziamento a rata

costante in 15 anni (ovvero il limite temporale massimo oltre il quale le banche vogliono altre oltre l'accesso privilegiato ai contributi in conto "energia") .

Differenziale di rendimento ($t_p=6\%$)

	Redditività investimento certo			
Capitale finanziato [Euro]	3,00%	3,50%	4,00%	4,50%
0%	1,27%	1,09%	0,91%	0,73%
25%	1,41%	1,21%	1,01%	0,82%
50%	1,66%	1,44%	1,22%	1,01%
75%	2,34%	2,06%	1,79%	1,53%
100%	2,69%	2,50%	2,30%	2,11%

Tabella 6.4

In tabella 6.5 sono riportati i differenziali di rendimento nelle medesime ipotesi di tabella 6.4 con differente solo il tasso di interesse passivo t_p pari al 9%.

Differenziale di rendimento ($t_p=9\%$)

	Redditività investimento certo				
Capitale finanziato [Euro]	3,00%	3,50%	4,00%	4,50%	6,75%
0%	1,27%	1,09%	0,91%	0,73%	-0,05%
25%	1,15%	0,95%	0,75%	0,55%	-0,29%
50%	0,89%	0,65%	0,41%	0,18%	-0,80%
75%	-0,01%	-0,36%	-0,70%	-1,05%	-2,63%
100%	-1,49%	-1,71%	-1,93%	-2,15%	-3,17%

Tabella 6.5

Al di là di ovvie considerazione circa l'influenza degli interessi passivi, emerge la convenienza dell'ipotesi alternativa soltanto in condizioni di bassa redditività dell'investimento certo. Notiamo che la bassa redditività dell'investimento "certo" è condizione così forte che anche in presenza di un forte differenziale tra interessi attivi e passivi (sintomo di un basso merito creditizio) permane la convenienza ad investire nella soluzione alternativa.

Possiamo concludere che, avendo a disposizione spazi improduttivi e soleggiati, nel caso di bassa redditività delle obbligazioni (ovvero in condizioni di bassa inflazione), può essere conveniente considerare l'ipotesi di investire nel fotovoltaico; se, poi, anche il costo del denaro si mantiene basso (ovvero in assenza di timori di surriscaldamenti dell'economia) può essere interessante ricorrere alla leva finanziaria per migliorare la propria redditività.

Cambiamo ora ottica ed assumiamo un punto di vista più propriamente energetico. Supponiamo di avere una piccola azienda con un'elevata bolletta elettrica; in particolare, ipotizziamo che i nostri consumi siano concentrati nelle ore diurne. Possiamo pensare di ridurre la bolletta elettrica ricorrendo ad un impianto fotovoltaico? Supponiamo di avere dei capannoni orientati a sud; dunque, si può pensare di installare su di essi i moduli fotovoltaici. Ipotizziamo che l'impianto sia dimensionato per l'autoconsumo: la taglia sia 30 kWp. Considerando anche il premio del 5% riconosciuto agli impianti oltre i 3 kWp con produzione integralmente consumata, il contributo incentivante è pari a 0,42 €/kWh. Poiché l'energia elettrica prodotta è tutta autoconsumata può tranquillamente essere valorizzata nella misura del costo evitato: ragionevolmente, si può pensare che in assenza di impianto fotovoltaico l'azienda avrebbe sopportato un costo unitario di 0,16 €/kWh che, dunque, diventa la base di calcolo del valore dell'energia prodotta con l'impianto fotovoltaico.

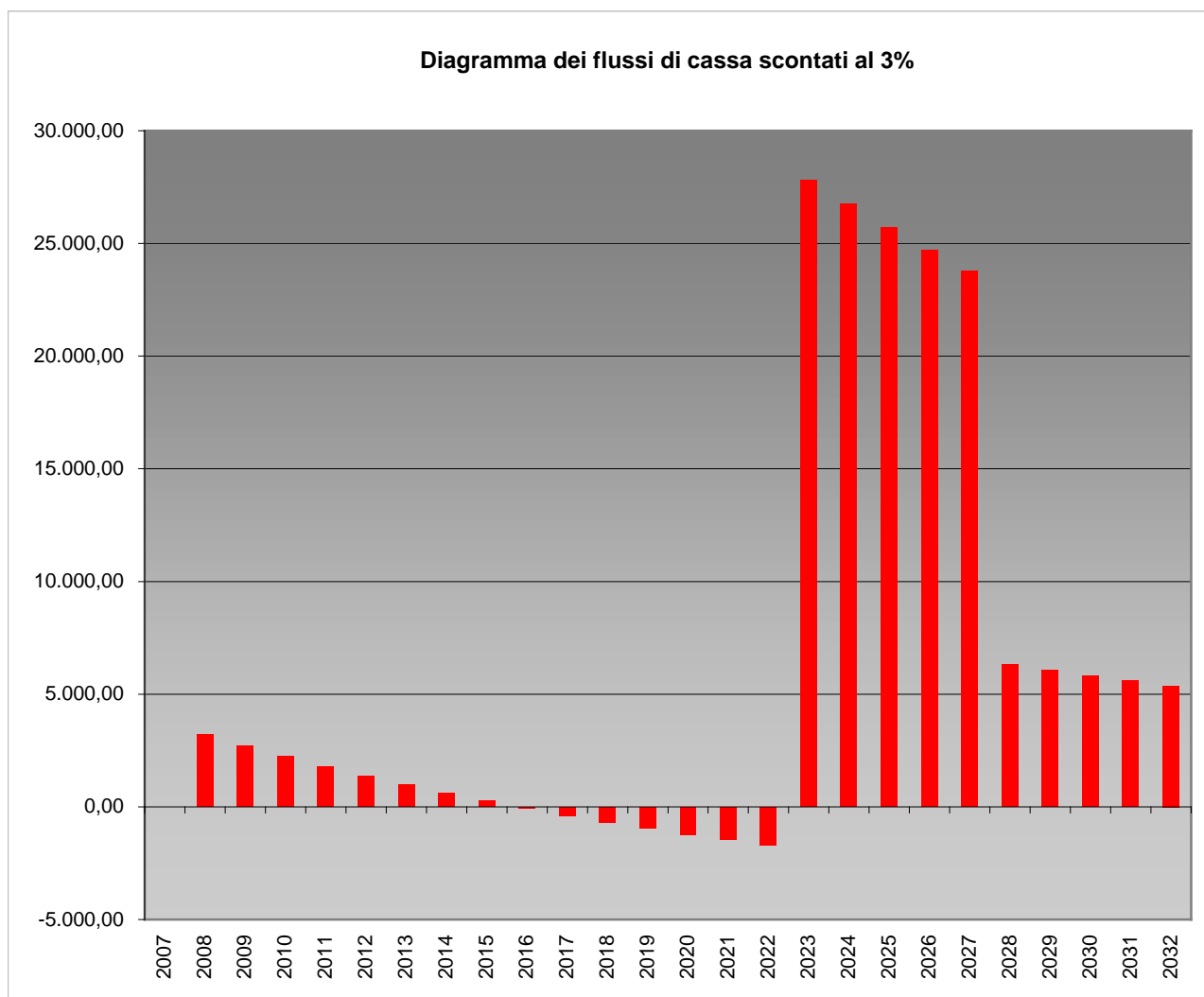
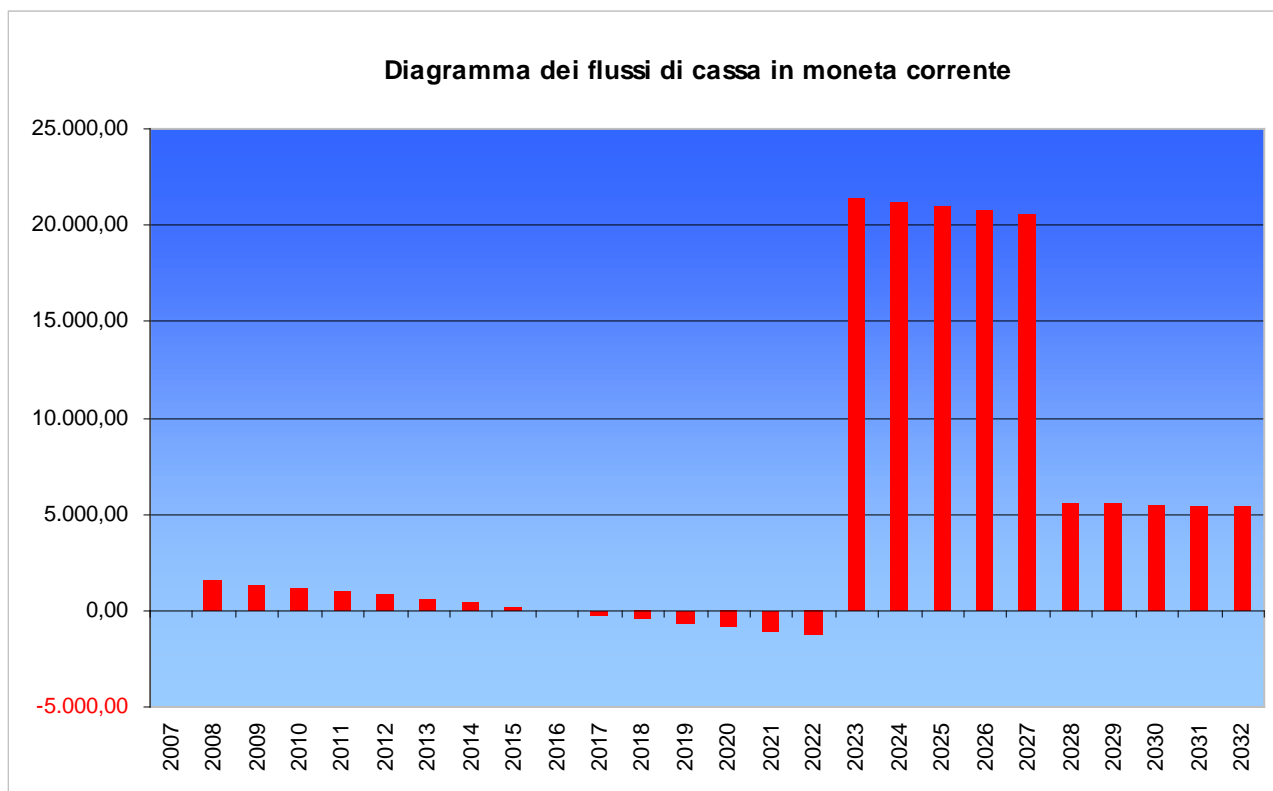
Per l'installazione dell'impianto si ipotizza un costo di 6.500 €/kWp: in totale sono necessari 195.000 €. Supponiamo che l'azienda abbia sottoscritto un prestito di pari importo con rimborso in 15 anni a rata costante e tasso di interesse pari all'8%. Per quanto riguarda le ipotesi circa dislocazione geografica, durata e prestazioni dell'impianto, valga ancora quanto già detto nei casi

precedente. Con queste ipotesi, ricorrendo al credito bancario, può costruire l'impianto senza cacciare un euro, addirittura guadagnandoci sopra come può dimostrare l'analisi dei flussi di cassa.

Nei primi otto anni di attività dell'impianto, l'azienda riesce a far fronte al rimborso del finanziamento semplicemente con i flussi di cassa generati; a partire dal nono anno e fino al termine del piano di rimborso, i flussi di cassa diventano negativi e l'azienda, sia pur per piccole cifre, deve attingere alle proprie disponibilità liquide. In ogni caso, i flussi di cassa degli anni in positivo sono più che sufficienti per compensare quelli degli anni in negativo. Si può così dire che l'azienda riesce a raggiungere l'obiettivo di ridurre i propri costi senza investire capitali propri.

L'analisi dei flussi di cassa scontati (al tasso del 3%) evidenzia al termine della vita dell'impianto un risultato positivo di 164.638,23 euro che riportato alla data di realizzazione dell'impianto equivale a maggiori introiti per 78.632,14.

E' evidente che i migliori benefici economici si ottengono dagli investimenti di carattere energetico e non finanziario, rispondendo appieno agli intenti legislativi di promozione delle fonti rinnovabili e di un uso razionale dell'energia.



6.4 IL SOLARE TERMODINAMICO

In questo caso, l'energia radiante è impiegata per realizzare cicli termodinamici del tutto simili a quelli realizzati nelle attuali centrali termoelettriche. La differenza è che il calore per la produzione di vapore da far espandere in turbina non è ottenuto bruciando combustibili fossili, ma attraverso specchi che concentrano la radiazione solare. Nelle cosiddette “torri solari” un sistema di specchi insegue il moto del Sole e ne concentra i raggi verso un recettore posto sulla sommità di una torre. Il calore solare è, quindi, raccolto da un fluido (in genere un sale fuso) che circola in continuazione tra la torre ed il serbatoio di accumulo.

Tra i fautori del solare termodinamico c'è Carlo Rubbia, fisico nucleare, vincitore del premio Nobel per la Fisica nel 1984. Rubbia ha recentemente sottoposto al CIEMAT, l'equivalente spagnolo dell'ENEA, il progetto di una centrale solare termodinamica. Nella fig. 6.2 è riportato uno schema esemplificativo della soluzione suggerita da Rubbia.

Tutto l'impianto è imperniato su alcuni specchi parabolici inseriti in una struttura a nido d'ape. Ogni specchio concentra l'energia radiante del Sole verso un tubo posto nel fuoco della parabola, formato da una struttura coassiale di due cilindri concentrici: la superficie più esterna è in vetro e ha un diametro di 115 mm, mentre quella interna è in acciaio ed ha un diametro di 70 mm. All'interno del tubo più interno, scorre una miscela di sali, costituita al 60% da nitrato di sodio, al 40% da nitrato di potassio. Questo sale, ampiamente usato come fertilizzante, è economico, facilmente reperibile e soprattutto compatibile con l'ambiente. Il sale in uscita dal serbatoio “caldo” (a circa 550°C) è inviato ad uno scambiatore di calore, dove viene prodotto il vapore da far espandere in turbina. Successivamente, il sale è convogliato verso un serbatoio “freddo” (a circa 290°C) da dove è prelevato il fluido che passa per il fuoco delle superfici captanti. Il calore accumulato nel serbatoio caldo serve a compensare le irregolarità dell'irraggiamento solare e a fornire energia anche di notte. Per meglio migliorare la raccolta di energia dal Sole, il computer

centrale è in grado calcolare la migliore inclinazione degli specchi ai fini della concentrazione dei raggi.

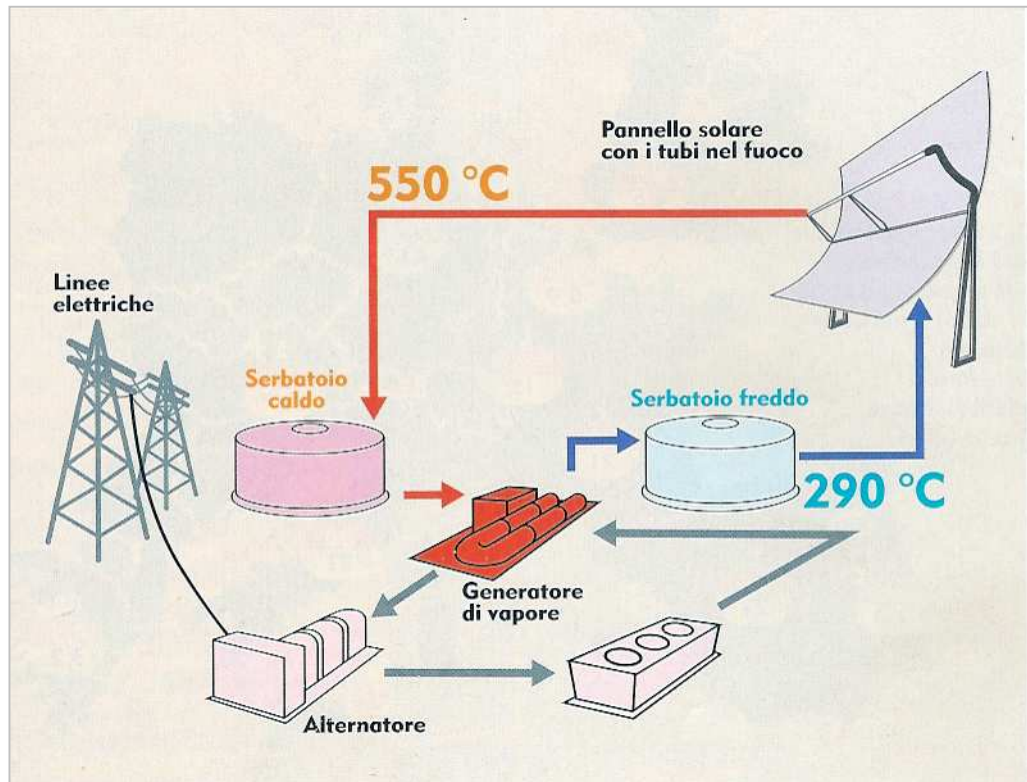


Figura 6.2

Un impianto a vapore con temperatura massima del ciclo di 550°C converte calore in energia termica con rendimenti abbondantemente superiori al 30% e dipendenti dalla pressione di lavoro del fluido. In condizioni reali, ad oggi, la conversione diretta di energia solare in energia elettrica mediante pannelli fotovoltaici al massimo può avvenire con rendimenti del 18%. Sulla carta il solare termodinamico sembrerebbe vincente. In realtà, le cose stanno ben diversamente. Un impianto a vapore è un sistema che non tollera transitori, ma deve essere gestito in condizioni stazionarie. Poiché la disponibilità di energia solare è fortemente intermittente, il solare termodinamico necessita di sistemi di accumulo tali da garantire il funzionamento dell'impianto anche in assenza di Sole. Dalla capacità termica del sistema di accumulo dipende il tempo di autonomia dall'irradiazione solare. Al crescere della capacità termica di accumulo, aumenta l'affidabilità dell'impianto in termini di continuità della produzione; contemporaneamente, però,

crescono le dispersione di energia termica ovvero, a parità di input esterno, diminuisce la capacità produttiva del generatore di vapore e, quindi, il rendimento globale della centrale elettrica. Così mentre il rendimento di un pannello fotovoltaico è praticamente indipendente dalle variazioni di radiazione solare, il rendimento del solare termodinamico decade rapidamente in condizioni di mutevole soleggiamento. Questa considerazione di fatto esclude la possibilità di utilizzare il solare termodinamico su scala globale, vincolando l'utilizzo solamente in zone aride e secche. D'altronde, mentre il fotovoltaico può essere impiegato anche per la realizzazione di impianti medio-piccoli, l'utilizzo del solare termodinamico è giustificato solo in centrali di produzione di grossa taglia. Pertanto, il solare termodinamico ben si presta ad essere impiegato nei deserti, mentre l'utilizzo potrebbe risultare poco conveniente da un punto di vista energetico. E da un punto di vista economico? Prevedendo di lavorare con un sistema di accumulo sufficientemente grande da consentire l'operatività 24 ore su 24, l'energia elettrica prodotta è comparabile con quella generata una centrale termoelettrica di pari potenza. Con la tecnologia del solare termodinamico sicuramente aumentano i costi di impianto: il risparmio di spesa per la mancata installazione di una caldaia è di gran lunga inferiore ai costi di realizzazione del campo di raccolta e del sistema di accumulo; contro, però, in esercizio si risparmia il costo del combustibile. Dunque, ipotizzando che nei due casi non varino vita media e spese di manutenzione, perché costo di produzione dell'energia elettrica generata con il solare termodinamico possa diminuire, occorre che il risparmio annuale in termini di mancato consumo di combustibile sia inferiore all'incremento della singola quota di ammortamento per effetto del sovraccosto di impianto.

Naturalmente, per evitare l'installazione del sistema di accumulo si può pensare di mettere in parallelo un generatore solare ed una caldaia tradizionale; in questo caso, però, poiché il fluido caldo che entra nel generatore di vapore deve essere lo stesso indipendentemente dalla fonte energetica impiegata, tra il generatore di calore ed il generatore di vapore occorre interporre uno scambiatore di calore, nel quale, verosimilmente, dovrebbero circolare nel circuito primario i fumi in uscita dalla caldaia, nel secondario il fluido che proviene dal generatore solare. In tal modo,

regolando opportunamente la caldaia, il contenuto energetico del fluido che entra nel generatore di vapore dal lato caldo. Cerchiamo di quantificare il beneficio energetico di questa soluzione.

Se in un deserto installiamo un pannello fotovoltaico da 1 kWp l'output elettrico è pari a 1500-2000 kWh/anno; un impianto tradizionale da 1 kW, invece, genera circa 8.500 kWh/anno. Rapportando queste due quantità, si calcola che in un anno mediamente l'impianto fotovoltaico restituisce il 18-24% dell'output fornito dal sistema tradizionale. Con questi numeri, in una centrale elettrica installata in deserto con in parallelo caldaia e generatore di calore solare, possiamo configurare, almeno in prima analisi, un risparmio di combustibile nella medesima misura. Quest'ultima ipotesi appare ragionevole perché da un lato occorre tenere conto che in applicazioni da solare termodinamico è quasi sempre presente un sistema automatico di inseguimento del Sole (che, ovviamente, determina un maggior contributo del generatore solare), dall'altro bisogna considerare le maggiori perdite per regolazione della caldaia e l'introduzione di uno scambio termico supplementare. In termini energetici, il risparmio di combustibile può determinare un incremento del 21-31% del rendimento del sistema tradizionale. Ipotizzando un rendimento dell'impianto a vapore tradizionale intorno al 40%, mettendo un generatore solare in parallelo alla caldaia, al massimo il rendimento totale sale al 49-52% ovvero un valore del tutto in linea con un normale ciclo combinato. In generale, il gioco non vale la candela, particolarmente se il combustibile impiegato è metano che ben si presta all'impiego in cicli combinati turbina gas-turbina vapore (TG-TV).

7. LE BIOMASSE

Come già indicato nei precedenti capitoli, la fonte solare potrebbe contribuire in maniera consistente a soddisfare il fabbisogno energetico mondiale. Può farlo mediante applicazioni che sfruttano direttamente l'energia solare o, diversamente, per via indiretta come nel caso delle biomasse.

Tutta la materia di matrice organica, vegetale ed animale, con esclusione di plastiche e materie fossili, è nota con il nome di biomassa.

In generale, le biomasse sono impiegate per scopi energetici (generazione diretta di energia e produzione di biocombustibili) o nella sintesi di prodotti.

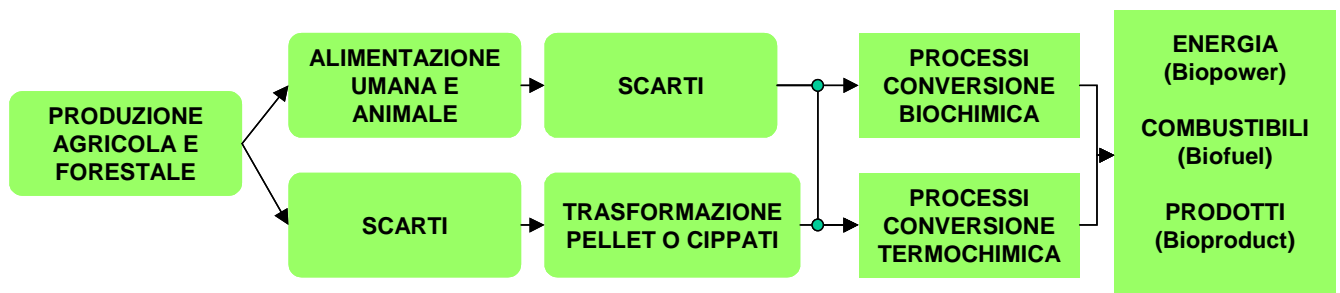


Figura 7.1: Schema delle filiere produttive che impiegano biomasse.

Come emerge da figura 7.1, tra la produzione di materia prima e gli impieghi ultimi sono quasi sempre interposti trattamenti di separazione, operazioni di modellazione e lavorazioni di processo al fine di adattare le biomasse agli scopi finali.

I processi intermedi più importanti sono sicuramente le conversioni biochimiche e/o termochimiche.

7.1 I PROCESSI DI CONVERSIONE BIOCHIMICA

I processi biochimici sfruttano le reazioni enzimatiche che avvengono ad opera di funghi e batteri che si formano nella biomassa in particolari condizioni ambientali. Utilizzano materiali umidi ad elevato tenore di azoto.

Materiali idonei a questo tipo di processo sono generalmente:

- colture acquatiche
- fogliame e cascami di patate, barbabietole, ortive...
- residui liquidi dell'industria zootecnica
- scarti di lavorazione
- reflui urbani ed industriali accumulati in discariche controllate.

I processi biochimici più adoperati sono la digestione aerobica e la digestione anaerobica.

7.1.1 Digestione aerobica

Consiste nella demolizione di molecole organiche complesse ad opera di batteri aerobici (che richiedono la presenza di ossigeno). Grazie ai batteri, sostanze più complesse vengono “demolite” in più semplici con liberazione di acqua, anidride carbonica e calore (in quantità proporzionale all'attività metabolica).

Il processo viene adoperato oltre che per la produzione di calore anche per il trattamento delle acque di scarico. Le fonti di questo tipo di processo sono in genere escrementi e rifiuti vegetali o animali; il processo presenta perciò il grande vantaggio di consentire la valorizzazione o il riciclo di sostanze di scarto in loco (viene spesso adoperato, ad esempio, per il riscaldamento delle serre e delle stalle).

7.1.2 Digestione anaerobica

Consiste nella demolizione, in assenza di ossigeno, di molecole organiche complesse ad opera di microrganismi. Le fonti di biomassa adoperate devono essere caratterizzate da un elevato contenuto di umidità; allo scopo si utilizzano generalmente escrementi animali (soprattutto reflui di allevamenti di bovini), reflui civili, rifiuti alimentari e rifiuti solidi urbani (frazione organica). Il prodotto del processo è un biogas, costituito per il 50-70% da metano e per la restante parte da CO₂; in genere, il potere calorifico di un biogas è pari a 20-25 MJ/Nm³. Il biogas, essiccato e compresso, può, quindi, essere utilizzato per l'alimentazione di caldaie, per la produzione di calore o eventualmente anche di elettricità in una centrale a ciclo combinato nonché come combustibile in motori a combustione interna opportunamente adattati.

Il residuo del processo di produzione del biogas è un effluente estremamente ricco di sostanze come azoto, fosforo e potassio ed è quindi particolarmente idoneo ad essere utilizzato come fertilizzante.

7.2 I PROCESSI DI CONVERSIONE TERMICHIMICA

Nei processi termochimici, le reazioni chimiche necessarie a trasformare la materia in energia avvengono, invece, grazie all'azione del calore; questa tipologia di processo viene adoperata con materiali poco umidi a basso tenore di azoto. Tipicamente i processi di conversione basati sull'azione termica vengono adoperati per il legname ed i suoi derivati o per i prodotti e gli scarti di lavorazione agroalimentare (ad esempio per residui di potature o gusci e noccioli...).

I processi termochimici più adoperati sono il cofiring, la pirolisi, la gassificazione.

7.2.1 Cofiring

E' il più economico dei processi di utilizzo delle fonti rinnovabili. Consiste nell'utilizzare in impianti preesistenti, tipicamente caldaie a carbone, una miscela di biomassa (fino al 15%) ed altro combustibile tradizionale, tipicamente, carbone. In questo modo è possibile ridurre i consumi della fonte tradizionale.

7.2.2 Pirolisi

E' un processo di decomposizione termica di sostanze organiche a temperatura compresa tra 400°C-800°C in presenza di una limitata quantità di agenti ossidanti (se l'apporto termico proviene da una parziale combustione della biomassa) o in totale assenza di aria (se l'apporto termico proviene integralmente dall'esterno).

I prodotti ottenuti dal processo sono costituiti da frazioni solide (contenenti residui a più alto peso molecolare), frazioni liquide oleose (contenenti acqua e composti organici a basso peso molecolare) e frazioni gassose (a basso/medio potere calorifico contenenti monossido di carbonio, anidride carbonica, acqua, idrogeno e idrocarburi). Le proporzioni di ognuna possono essere variate agendo sulle condizioni in cui viene effettuato il processo (temperatura di reazione, tempo di residenza della biomassa, velocità di riscaldamento, eventuale utilizzo di catalizzatori) o intervenendo sulla geometria della biomassa trattata. Naturalmente, il processo varia in funzione della composizione chimica della biomassa.

Di seguito riassumiamo schematicamente i principali tipi di processo in funzione delle peculiarità del prodotto ottenuto.

La **carbonizzazione** consiste nella combustione a 300-500°C di legname e prodotti cellulosici disposti in cataste a forma di cono, ricoperte da terra e dotate di un camino centrale di

sfogo; le carbonaie possono trovarsi all'aperto o in storte (contenitori a forma di fiasco che consentono di aumentare la resa del processo). Per effetto della lenta combustione l'acqua e le sostanze volatili contenute nel legname di partenza vengono eliminate dando luogo alla produzione di carbone di legna o carbone vegetale.

Nella **pirolisi tradizionale**, il processo termico viene effettuato a temperature inferiori a 600°C con tempi di residenza moderati, dando luogo ad una miscela di fasi solide, liquide e gassose in proporzioni comparabili.

Nella **pirolisi veloce**, il processo è come nel caso precedente con la differenza che i tempi di residenza sono più brevi al fine di favorire la formazione della frazione liquida. Addirittura salendo al di sopra dei 700°C e riducendo ulteriormente i tempi di residenza molto al di sotto del secondo si può ottenere una miscela con frazione liquida di circa l'80% in massa.

7.2.3 Gassificazione

E' un processo di riscaldamento che avviene a temperature intorno ai 1000°C in presenza di piccole quantità di ossigeno. Comporta la trasformazione di materiali organici in gas poiché, per effetto del riscaldamento, i componenti della biomassa si scindono in molecole più semplici formando il cosiddetto syngas ovvero un gas sintetico composto da azoto molecolare, vapor d'acqua, monossido di carbonio, idrogeno, metano, anidride carbonica e una piccola frazione di idrocarburi più pesanti.

Il syngas può essere adoperato:

- per ottenere calore (usandolo come combustibile in una caldaia);
- come combustibile nei motori a combustione interna (ad esempio, trasformato in alcool etilico);
- per ricavare idrogeno;

- per produrre elettricità.

7.3 I BIOCOMBUSTIBILI

Correttamente il termine biocombustibile (o anche biofuel) dovrebbe indicare tutti i combustibili da biomassa. Correntemente, però, si intendono soprattutto i combustibili allo stato liquido derivanti da biomasse ed utilizzati principalmente nel settore dei trasporti. I più importanti sono il bioetanolo, il biodiesel ed il metanolo.

7.3.1 Bioetanolo

E' un alcol ottenuto mediante la fermentazione di biomasse di natura vegetale ricche di glucidi ad opera di microrganismi che fungono da biocatalizzatori; più raramente, per la sintesi del carburante si ricorre a soluzioni tecnologiche. Come materia prima sono solitamente utilizzati cereali, colture zuccherine, sostanze amidacee e vinacee.

Il bioetanolo può essere adoperato come componente delle benzine per la preparazione dell'ETBE, un composto organico adoperato per aumentare il numero di ottano in alcune benzine.

Le miscele con percentuale di bioetanolo fino al 20% possono essere impiegati in motori tradizionali senza modifiche sostanziali; diversamente, con percentuali via via crescenti servono motori specificamente progettati.

Il bioetanolo è ad oggi ritenuto il carburante alternativo a quelli fossili più interessante perché rappresenta il miglior compromesso in termini di prezzo, prestazioni e disponibilità.

7.3.2 Biodiesel

Il biodiesel, che presenta caratteristiche simili al gasolio ottenuto dalla distillazione frazionata del petrolio, non è propriamente un olio vegetale puro, bensì il risultato di un processo chimico. E' ottenuto da oli vegetali, grassi animali e grassi da cucina riciclati attraverso un processo di transesterificazione che consente di trasformare un estere in un altro per reazione con un alcol. Poiché gli oli vegetali sono costituiti da tre catene di acidi grassi attaccati ad una molecola di glicerina, la transesterificazione è necessaria per rimuovere la molecola di glicerina e rendere più fluido l'olio in modo da prevenire il rischio di danni derivanti dall'accumulo di depositi sul motore.

Il biodiesel può essere adoperato in campo motoristico e nelle caldaie degli impianti di riscaldamento.

I principali pregi del biodiesel sono:

- nei motori moderni può essere utilizzato senza particolari modifiche sia puro che miscelato;
- se generato all'interno di una filiera produttiva con $EROEI > 0$, contribuisce a ridurre le immissioni di gas serra in atmosfera;
- è atossico e biodegradabile in 30 giorni, per cui mescolato al gasolio ne triplica la biodegradabilità.

I principali limiti del biodiesel sono:

- genera maggiori emissioni di NO_x ;
- causa una riduzione delle prestazioni dell'8-15% rispetto al diesel tradizionale (avendo un diverso contenuto energetico);
- comporta la necessità di integrare i serbatoi di stoccaggio con riscaldatori ed agitatori poiché ha una temperatura di fusione più elevata di quella del gasolio e tende a gelare nelle giornate fredde.

Esistono centinaia di coltivazioni vegetali da cui è possibile trarre la materia prima da cui produrre biodiesel.

Di seguito sono fatti alcuni cenni alle più importanti.

- ***Alghe***

L'olio si ottiene in questo caso per spremitura a freddo di alghe fatte maturare in vasche piene di una soluzione salina ed esposte al sole. Secondo uno studio condotto negli Stati Uniti dal Laboratorio nazionale sulle energie rinnovabili tra il 1976 e il 1998 (non portato a termine per problemi legati alla forte escursione termica nel Nuovo Messico, zona dell'esperimento), con vasche fino a 1000 m² si potrebbero produrre fino a 5475 kg/anno di olio.

- ***Arachidi***

Fortemente adoperati nell'industria alimentare, sia come semi che per produrre oli di semi di arachide e burro, vengono utilizzati limitatamente per il biodiesel. Fruttano circa 1060 litri olio/ettaro all'anno.

- ***Cartamo***

Pianta annuale che frutta circa 780 litri di olio per ettaro. L'olio è adoperato come olio da cucina ma anche nelle cere, nel linoleum e nelle vernici.

- ***Colza***

Pianta coltivata per l'olio e per il nutrimento del bestiame. Fornisce circa 1190 litri di olio per ettaro all'anno. I residui della spremitura vengono utilizzati come mangime proteico

per gli animali. La colza rappresenta l'84% delle materie prime da cui si ricava il biodiesel nel mondo.

- ***Fagioli di soia***

L'olio di soia viene adoperato come olio da tavola e per le margarine, oltre che per la produzione di saponi, insetticidi, disinfettanti ed inchiostro. Negli Stati Uniti rappresenta la principale materia prima da cui si ottiene biodiesel, mentre nel mondo copre appena l'1% della produzione del biocombustibile (445 litri per ettaro).

- ***Girasole***

I semi di girasole occupano il secondo posto per la produzione mondiale di olio per usi alimentari e coprono il 13% della produzione mondiale di biodiesel. L'olio di semi di girasole viene anche adoperato per margarine e condimenti, lubrificanti, saponi e tinture. La resa è pari a circa 950 litri per ettaro.

- ***Granturco o mais***

Con una resa di circa 170 litri per ettaro copre circa l'8% della produzione di biodiesel con oli vegetali. Come arachidi e girasole, anche l'olio di semi di mais è adoperato in cucina.

- ***Grassi di origine animale***

Rappresentano la risorsa più economica per ottenere biodiesel, sfruttando i sottoprodotti della industria delle carni. L'utilizzo per la produzione di biodiesel con grassi animali presenta molteplici vantaggi:

- sono disponibili in grosse quantità (particolarmente negli Stati Uniti);

- consentono il problematico smaltimento delle carcasse di animali soprattutto di quelli infettati dalla encefalopatia bovina o comunque sospetti;
- rispetto a qualunque altra materia grassa di origine vegetale, consentono di produrre biodiesel con minimo impatto ambientale

▪ ***Jathropa***

E' un arbusto coltivato come pianta medicinale prevalentemente in alcuni Paesi sudamericani ed in Africa. L'olio viene adoperato come combustibile per lampade, nonché nella produzione di saponi, candele e veleni. Ad oggi l'utilizzo per la produzione di biodiesel è bassissimo ma secondo molti esperti del settore vedrà notevoli sviluppi.

▪ ***Oli di cucina usati***

Come i grassi animali rappresentano una risorsa a basso costo per la grande disponibilità: basti pensare che per la sola frittura delle patatine vengono adoperati ogni anno più di 11 miliardi di litri di olio. L'utilizzo per la produzione di biodiesel presenta inoltre il vantaggio di ridurre il problema dello smaltimento (che spesso viene effettuato nelle discariche o nelle fognature). Presentano lo svantaggio, rispetto agli oli vegetali, di richiedere trattamenti aggiuntivi (a monte e a valle della transesterificazione) per la purificazione dalle contaminazioni di cibo.

▪ ***Olio di cocco***

Dopo gli oli di arachide e di soia, rappresenta il terzo olio più prodotto al mondo. La pianta consente una resa di 2689 litri all'anno per ettaro. Le varie parti dell'albero presentano molteplici utilizzi (spago, corde, lubrificanti, margarine, gelati...). Per ricavare l'olio si procede alla pressatura della polpa del frutto essiccata. I resti vengono generalmente utilizzati come mangime per il bestiame.

- ***Olio di palma***

Dall'albero della palma estremamente diffuso in Africa e usato in altri Paesi come pianta ornamentale, si ricavano due tipologie di olio: l'olio di palma (estratto dalle parti più carnose del frutto) e l'olio di noce da palma (estratto dai noccioli del frutto). Il combustibile derivante dall'olio di palma ha una temperatura di fusione elevata e quindi non risulta adatto ai climi più freddi. Sebbene abbia una resa di 5950 litri per ettaro, l'olio di palma rappresenta solo l'1% del totale delle materie prime per la produzione di biodiesel. E' molto adoperato nell'industria dolciaria e in quella dei detergenti.

- ***Senape***

L'olio estratto dai semi della senape è molto studiato, soprattutto negli Stati Uniti, ma al momento poco adoperato per il biodiesel: fino ad ora, infatti, è stato privilegiato nella produzione di mostarde, lubrificanti e oli per capelli. Spesso viene considerata un'erbaccia per cui è poco sfruttato.

7.3.3 Metanolo

Noto anche come alcool metilico o alcool del legno si ottiene, oltre che dal gas naturale, anche per gassificazione dalle biomasse. La biomassa, vaporizzata ad elevata temperatura, viene filtrata per rimuovere le impurità e quindi fatta passare su un catalizzatore che la converte in metanolo. Viene adoperata come additivo per ridurre le emissioni inquinanti dei carburanti.

7.4 IL POTENZIALE ENERGETICO DELLE BIOMASSE

Il 90% delle biomasse presenti sulla Terra sono di origine vegetale. La sopravvivenza della materia organica di cui è costituita la vegetazione che ricopre il nostro pianeta è garantita dalla fotosintesi clorofilliana, che è il processo biologico attraverso cui piante, alberi ed organismi vegetali in genere trasformano l'energia solare in energia chimica con cui provvedono al proprio sostentamento e all'accrescimento. In prima analisi, la fotosintesi clorofilliana può essere considerata un processo endotermico grazie al quale anidride carbonica ed acqua, in presenza di luce, si combinano per formare glucosio e liberare ossigeno. In realtà, però, il processo è molto più complesso ed è costituito da più reazioni, alcune delle quali si realizzano in presenza di luce (fase luminosa), altre in assenza di luce (fase oscura).

Facendo bruciare le biomasse si ottiene la liberazione dell'energia immagazzinata (sotto forma di calore) ed il rilascio di anidride carbonica e acqua, pronte ad essere utilizzate in un nuovo ciclo di fotosintesi. Le biomasse, rigenerandosi in intervalli temporali confrontabili con la scala dei tempi umani, sono risorse rinnovabili.

Poiché bruciando le biomasse, ritorna in atmosfera lo stesso quantitativo di anidride carbonica che era stato prelevato durante l'accrescimento, è possibile concludere, almeno in prima analisi, che le biomasse non determinano contributi netti all'effetto serra.

Non è facile ricavare stime attendibili circa l'attuale contributo delle biomasse al soddisfacimento del fabbisogno energetico mondiale. Infatti, il valore energetico della produzione annuale di biomasse attraverso i processi di fotosintesi clorofilliana è configurabile nella misura dello 0,08% della quantità totale di energia che arriva sulla crosta terrestre; si tratta, in concreto, di circa 55 Gtep, un valore che è circa 5 volte il fabbisogno energetico mondiale. Dovendo dare la precedenza ad impieghi maggiormente prioritari (per esempio, i bisogni alimentari di uomini ed animali), solo una piccola parte del potenziale generato dalla fotosintesi clorofilliana è effettivamente disponibile per impieghi energetici. In ogni caso, la stima dei contributi delle

biomasse per usi energetici è tutt'altro che semplice, visto che una buona parte delle stesse (foglie secche, scarti di lavorazione agricola, piante morte, ecc) è smaltita in ambiente o tramite combustione senza finalità di recupero energetico. Pertanto, una contabilità effettiva degli impieghi energetici può essere fatta soltanto negli impianti industriali alimentati a biomassa. D'altronde, nella maggior parte degli impieghi industriali, le biomasse provengono da colture specificamente impiantate che utilizzano fertilizzanti, serre, tendoni, calore derivante da altri fonte energetiche; dunque, per esempio, anche facendo riferimento alla produzione complessiva di bio-combustibile il rischio di ottenere risultati falsati è enorme, in quanto per ragioni economiche la produzione è “*dopata*” con altri input energetici. D'altronde, un colosso della produzione petrolifera del calibro di British Petroleum ha scelto di non contemplare il contributo delle bio-masse nelle proprie relazioni ambientali proprio perché di difficile valutazione. In ogni caso, anche nelle situazioni più favorevoli è ben difficile configurare contributi reali superiori a qualche punto percentuale.

7.5 I LIMITI DELL'IMPIEGO ENERGETICO

L'impiego energetico delle biomasse è in realtà limitato da diverse considerazioni. In generale, per poter impiegare utilmente il potenziale chimico delle biomasse è necessario procedere, preliminarmente, a trattamenti termici o chimici di trasformazione. Secondo alcune stime, allo stato attuale, il 99,6% circa dell'energia accumulata nella fotosintesi “viene persa” durante questi trattamenti. In altre parole, solo lo 0,4% dell'energia si trasforma in potere calorifico utile. Per ottenere valori significativi di energia prodotta sarebbe quindi necessario ricorrere a quantità di biomassa notevoli; ad esempio, volendo utilizzare i prodotti culturali specificamente piantati per scopi energetici, risulterebbe necessario un impegno in termini di ettari di terreno estremamente significativo e non facilmente sostenibile. In Italia, ad esempio, circa il 50% dei terreni “utili” sono

dedicati a colture alimentari e le restanti superfici non sempre si prestano alla coltivazione (terreni montuosi, parchi naturali, zone scoscese, ecc.); stimando che per coprire tutto il fabbisogno di energia elettrica del nostro Paese con biomassa non sarebbe sufficiente l'attuale superficie coltivata, si può avere idea del limitato ruolo che le biomasse di origine vegetale possono rivestire nell'ambito dei sistemi energetici.

Se, inoltre, aggiungiamo i costi i costi energetici di produzione (lavorazione del terreno, semina, fertilizzazione, pesticidi), di raccolta e di trasporto all'impianto, spesso si può arrivare ad un EROEI negativo. In questo caso, la biomassa non è più una fonte energetica; al massimo è un rifiuto da smaltire, cercando di recuperare energia. D'altronde, non si può concludere che le biomasse non siano interessanti dal punto di vista energetico; semplicemente la scelta deve essere analizzata opportunamente in funzione del contesto ambientale, sociale e geografico; per esempio, nelle zone in cui sono presenti molti terreni incolti, le colture di vegetali per la produzione di biomasse possono costituire, con le opportune condizioni al contorno, un'opportunità perché consentono la valorizzazione di risorse locali non sfruttate; così pure la produzione di energia da biomassa si adatta molto bene a quelle zone in cui sono presenti materiali agricoli in eccedenza²; o anche ha senso ricorrere alle biomasse quando occorre operare in aree difficilmente raggiungibili, che in questo modo possono essere rese autonome dal punto di visto energetico.

E' necessario, infine, tener conto di un altro aspetto fondamentale ai fini della nostra analisi. Nei Paesi in cui si sta seguendo la strada della coltivazione energetica da biomassa si sta reiterando ciò che avviene per le coltivazioni di tipo alimentare ovvero è praticata un "agricoltura intensiva" con colture annuali. Ricorrere a queste tecniche di sfruttamento del terreno (volte a massimizzare la qualità del prodotto o la resa per unità di superficie) contribuisce a distruggere la biodiversità e a limitare la naturale evoluzione degli ecosistemi naturali. In altre parole, incentivando le colture da biomassa con tecniche di agricoltura intensiva, si rischia di danneggiare l'ambiente anziché

² Nei paesi del centro-nord europeo quando è entrata in crisi l'industria del legname, si è cominciato ad utilizzare la produzione in eccedenza per il riscaldamento ed il teleriscaldamento; l'utilizzo per la produzione di energia è divenuto una nuova opportunità, un mercato di sbocco alternativo

migliorarlo; come dichiarato, infatti, nel rapporto delle Nazioni Unite “*Millenium Ecosystem Assessment 2005*”, l’agricoltura potrebbe rappresentare “*la più grande minaccia per la biodiversità e l’ecosistema di qualunque altra attività umana*”.

Attualmente l’80% del suolo agricolo mondiale è occupato da colture destinate all’alimentazione umana e la maggioranza di alimenti proviene (direttamente o indirettamente attraverso la catena alimentare) da coltivazioni di cereali, legumi e semi oleosi. Al fine di massimizzare la produzione e lo sfruttamento del suolo, le piante adoperate sono piante annuali, che richiedono un maggior uso di risorse “esterne” e, contemporaneamente, determinano l’impoverimento dei terreni agricoli in superficie. Prima che l’uomo iniziasse la pratica dell’agricoltura, la Terra era quasi interamente ricoperta da piante perenni. Queste ultime sono caratterizzate da radici molto più estese e capaci di scendere in profondità: infatti, le piante annuali mediamente non oltrepassano i 30 cm di profondità, laddove le perenni possono arrivare anche a 2 m. Di contro, però, le piante perenni sono meno “addomesticabili” (per esempio rendono più difficoltosa la trebbiatura) ed i frutti sono esteticamente meno “invitanti” ovvero di minor valore commerciale; per questo i nostri antenati hanno deciso di sostituirle con varietà annuali.

Da una serie di studi che ha messo al confronto le due tipologie di colture, è emerso che le piante perenni:

- andando “in profondità”, a parità di resa richiedono un minor apporto esterno di acqua e sostanze nutritive ovvero, traendo nutrimento solo dalla terra, crescono maggiormente delle annuali;
- avendo un periodo di crescita più lungo, sottraggono all’atmosfera una maggiore quantità di carbonio ovvero, a parità di carbonio prelevato, lo fissano per un maggior tempo, contribuendo a ridurre l’effetto serra;
- essendo più resistenti, si adattano meglio ai cambiamenti climatici, particolarmente al riscaldamento globale;

- non avendo la necessità di essere piantate ogni anno, richiedono un minore uso di macchinari agricoli ovvero in fase di crescita necessitano di minori apporti energetici di origine umana;
- impoveriscono di meno gli strati superficiali di terreno potendo attingere sostanze nutritive anche a maggiore profondità;
- presentano una produzione di semi estremamente inferiore rispetto alle piante annuali.

Per tutti i vantaggi illustrati e, ritenendo di poter “fronteggiare” il limite della scarsa produzione di semi delle perenni, sono iniziati in molti paesi programmi di ricerca che, sfruttando i progressi fatti nel campo delle biotecnologie vegetali, puntano alla creazione di colture perenni di cereali ad elevato rendimento. Poiché allo stato dell’arte la ricerca è agli inizi, si spera e si prevede che il risultato sarà utilizzabile su vasta scala non prima di 25-30 anni. Si tratta di un dato estremamente interessante che dovrebbe indurre ad una seria riflessione prima di dare seguito, in maniera indiscriminata, a politiche di sostegno della colture per fini energetici.

Alla luce di quanto detto in precedenza, è evidente che tranne nei casi particolari di zone con grossa disponibilità di terreni incolti e/o di prodotti agricoli in eccedenza, l’utilizzo di biomasse per scopi energetici dovrebbe essere subordinato ad un’attenta analisi dei risultati conseguibili. Da un punto di vista strettamente ambientale, solamente gli impieghi energetici delle biomasse con ciclo integrato di produzione/consumo con $EROEI > 0$ dovrebbero essere incentivati; diversamente, infatti, si corre il rischio di rendere economicamente attrattivi usi energetici che, invece di produrre energia, la consumano.

7.6 SE LA BIOMASSA E' UN RIFIUTO

Di tutt'altro aspetto è l'analisi dei benefici quando l'obiettivo non è produrre energia, bensì recuperarla. Le biomasse, infatti, comprendono anche taluni rifiuti di origine vegetale, animale, civile o industriale che occorre smaltire indipendentemente da considerazioni di carattere energetico. La combustione dei rifiuti, dunque, risponde alla necessità di evitare che tali biomasse finiscano in discarica o vadano ad accumularsi in forma sparsa. Nel rispetto delle prescrizioni in tema di inquinamento, bruciare rifiuti consente di dare un contributo positivo all'ambiente, particolarmente se si procede mediante termovalorizzazione ovvero impiegando utilmente l'energia termica liberata durante la combustione. Al di là di ovvie considerazioni circa l'opportunità di smaltire materiale che teoricamente può essere fonte di contaminazione del territorio, il recupero energetico consente di fornire contributi positivi alla gestione del problema del riscaldamento globale. Infatti, per effetto della decomposizione della materia organica di cui è costituito, il rifiuto che giace in discarica nel breve-medio periodo libera in atmosfera CO_2 e/o CH_4 , due gas fortemente climalteranti (soprattutto il secondo). Invece, con il recupero energetico delle biomasse, all'inevitabile produzione di gas climalteranti per decomposizione organica diventa possibile associare un flusso energetico positivo che determina un minor consumo di combustibile fossile ovvero un risparmio in termini di immissione di CO_2 in atmosfera. Naturalmente, indipendentemente dall'obiettivo ultimo della combustione di biomasse, è fondamentale che l'approvvigionamento della materia prima costi il meno possibile in termini energetici. Infatti, per rendere ottimale l'utilizzo delle biomasse è fondamentale che l'utilizzazione avvenga nelle immediate vicinanze della zona di produzione al fine di evitare che la combustione delle biomasse divenga eccessivamente penalizzante in termini energetici e/o economici.

7.7 IL RUOLO DELLE BIOMASSE NEGLI SCENARI ENERGETICI

Con circa 1.230 Mtep/anno di consumi, le biomasse nel mondo rappresentano ben oltre il 10% dell'offerta energetica globale, ma il livello di diffusione è nettamente diverso tra Paesi in via di sviluppo e Paesi industrializzati.

Nei primi, con le biomasse viene soddisfatto circa il 34-40% del fabbisogno energetico complessivo, finanche arrivando a coprire in alcune zone fino al 90% del fabbisogno grazie all'utilizzo di legno, paglia e deiezioni animali. Nei Paesi industrializzati, invece, con le biomasse si copre più o meno il 2-3% del fabbisogno energetico.

In Europa si osserva un maggiore sviluppo nei paesi del Nord dove, bruciando gli scarti dell'industria forestale, si copre in Finlandia il 18% del fabbisogno energetico e in Svezia il 17%. In Austria si arriva al 13%.

La Svezia e l'Austria, che sono paesi tradizionalmente abituati all'utilizzo della legna da ardere, hanno dato vita a grandi colture energetiche di specie arboree come pioppo, robinia, betulla, salice, eucalipto che sfruttano mediante ceduzione ad intervalli brevi (1-4 anni), ovvero massimizzando la resa di materia prima.

La Francia, paese con la più vasta superficie agricola in Europa, sta puntando su biodiesel ed etanolo, che sta incentivando in termini di utilizzo con una politica di defiscalizzazione.

L'Inghilterra, ritenendo antieconomico l'utilizzo di biocombustibili, ha sviluppato un vasto sistema di recupero di biogas dalle discariche.

In Italia, si stima che solo il 2,5% del fabbisogno energetico nazionale sia soddisfatto mediante biomasse.

Di primo acchito, la stima del 15% circa il contributo delle biomasse al fabbisogno energetico mondiale può sembrare sorprendente. In realtà, occorre considerare che il grosso della produzione è concentrato nei Paesi in via di sviluppo ovvero laddove si procede ad una sistematica opera di deforestazione sia per guadagnare superfici coltivabili sia per attingere risorse energetiche.

Nei paesi in via di sviluppo, dunque, lo sfruttamento energetico delle biomasse è tale che queste non possono essere considerate rinnovabili: ogni anno, dunque, si consumano biomasse ben oltre la capacità annua di rigenerazione delle stesse. In altri termini, i Paesi in via di sviluppo attingono continuamente dal patrimonio forestale mondiale, generando un progressivo impoverimento della flora planetaria e contribuendo non poco all'avanzata dei deserti.

Verosimilmente, i dati relativi ai Paesi industrializzati sono molto più indicativi perché relativi a situazioni di regime dove tendenzialmente si evita di attingere dalle riserve forestali e non si oltrepassa la capacità di rigenerazione annua delle biomasse.

8. L'IDROGENO

Ne *“L'isola misteriosa”* di Jules Verne, l'ingegnere Cyrus Smith afferma: *“Sì, amici, io credo che l'acqua sarà un giorno impiegata come combustibile, che l'idrogeno e l'ossigeno di cui è costituita, utilizzati isolatamente o simultaneamente, offriranno una sorgente di calore e di luce inesauribili e di un'intensità che il carbon fossile non può dare. L'acqua è il carbone dell'avvenire”*. Il giorno tanto auspicato da Cyrus Smith non è ancora arrivato, ma soprattutto non arriverà mai! L'acqua non sarà mai il carbone dell'avvenire perché, pur preziosissima per la vita, nella catena energetica è ad un livello infimo. Non può liberare energia! Però può accettarla fino a liberare l'idrogeno e l'ossigeno da cui è costituita, offrendo al mondo la sorgente di calore e di luce tanto invocata. Il sogno di estrarre energia dall'acqua è svanito, ma rimane lui, l'idrogeno, un vettore energetico pulito e flessibile come nessun altro mai!

8.1 LE PROPRIETA' CHIMICO-FISICHE

L'idrogeno, simbolo H, è il primo elemento della tavola periodica. L'idrogeno elementare ha numero atomico 1 e massa atomica pari a 1,008 uma.

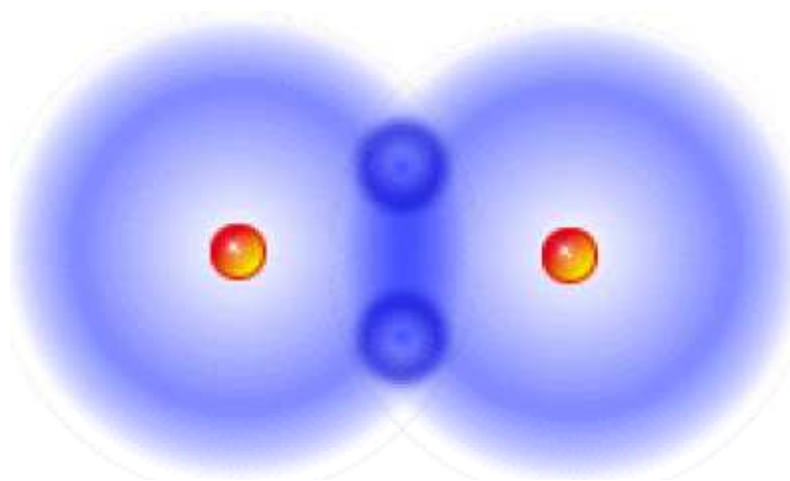


Figura 8.1 - La molecola dell'idrogeno

In condizioni normali di temperatura e pressione ($T = 25^{\circ}\text{C}$ e $p = 1 \text{ atm}$), se due atomi di idrogeno entrano in contatto, si uniscono in una molecola biatomica, simbolo H_2 , dando origine ad un gas incolore, inodore, insapore, insolubile in acqua, estremamente leggero e molto reattivo.

L'idrogeno molecolare è estremamente leggero: alla pressione di 1 atm (0,0103 Mpa) ed alla temperatura di 20°C , ha una densità pari a $8,38 \text{ g/m}^3$; anche in fase liquida, risulta estremamente leggero con una densità di $70,8 \text{ kg/m}^3$, estremamente bassa se si considera che in un 1 m^3 di acqua sono contenuti ben 111 kg di idrogeno atomico.

Proprietà	Unità di misura	Misura
Peso molecolare	Uma	2,016
R	J/kgK	4.124
Densità gas ($T = 20^{\circ}\text{C}$, $p = 0,1013 \text{ Mpa}$)	Kg/m^3	0,00838
Densità liquido	Kg/m^3	70,8
Temperatura di fusione	K	14,025
Temperatura di ebollizione	K	20,268
T_{critica}	K	32,94
p_{critica}	MPa	1,55
Temperatura di autoignizione	K	858
Limiti di infiammabilità (in aria)	%volumetrica	4%-75%
Calore specifico	KJ/kgK	14,89

Tabella 8.1 - Proprietà fisiche H_2 ($T=20^{\circ}\text{C}$, $p=1 \text{ atm}$)

L'idrogeno molecolare è presente in atmosfera solo in ridottissime quantità (essendo 14,4 volte più leggero dell'aria, non viene trattenuto da questa, ma si disperde nello spazio); pur tuttavia, dall'analisi degli spettri solari e stellari risulta l'elemento più abbondante nell'universo. In ogni caso, è presente in grandi quantità anche sulla Terra, ma legato in diversi composti, tra i quali il più importante è l'acqua, H_2O . Inoltre è presente in tutti gli idrocarburi, in molte sostanze organiche ed in tutti gli acidi.

L'idrogeno è principalmente un combustibile, ma non è una fonte energetica. Infatti, esistendo in natura praticamente solo allo stato legato, per disporre di idrogeno molecolare occorre spendere più energia di quanto sia possibile ottenere con una reazione di combustione.

In tabella 8.1 sono riportate alcune delle principali proprietà fisiche dell'idrogeno molecolare.

8.2 GLI IMPIEGHI

L'idrogeno trova moltissimi impieghi in numerosi settori dell'industria e della ricerca.

Enormi quantità di idrogeno vengono usate nella produzione di ammoniaca o alcol metilico; o anche nei processi di idrogenazione degli oli (per ottenere grassi commestibili), del carbone (per produrre petrolio sintetico), del petrolio (per migliorare benzine ed altri derivati).

In metallurgia, l'idrogeno è anche un componente essenziale per alcuni trattamenti dei metalli. Per esempio, è usato nelle fiamme ossidriche ad alta temperatura, per tagliare, fondere o saldare i metalli.

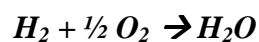
Essendo il più leggero fra tutti i gas, può essere utilizzato per il riempimento di mongolfiere e dirigibili. Per i meno giovani, per esempio, è ancora vivo il ricordo dei primi dirigibili tedeschi, i mitici Zeppelin, saliti alla ribalta per memorabili crociere transoceaniche. Oggi gli viene spesso preferito l'elio che ha circa il 92% del suo potere ascensionale, ma, essendo un gas nobile (dunque, non infiammabile), fornisce maggiori garanzie in termini di affidabilità.

In ogni caso, l'idrogeno è soprattutto un ottimo combustibile e può essere utilizzato per produrre energia in due modi:

- mediante combustione diretta (anche in aggiunta ad altri combustibili);
- attraverso ossidazione elettrochimica nelle celle a combustibile.

8.3 LA COMBUSTIONE DIRETTA

La reazione teorica di combustione dell'idrogeno molecolare è:



$$\Delta H^0 = -285,830 \text{ MJ/kmole}$$

In tabella 8.2 sono riportate altre importanti proprietà dell'idrogeno molecolare.

Proprietà	Unità di misura	Valore
PCS (in massa)	MJ/kg	142,9
PCS (in volume)	MJ/Nm ³	118,9
PCI (in massa)	MJ/kg	120,9
PCI (in volume)	MJ/Nm ³	99,6
Rapporto stechiometrico (in aria)		2,38
Rapporto stechiometrico (con O ₂)		0,5
Produzione specifica di CO ₂	g/kWh	0
Produzione specifica di H ₂ O	g/kWh	45

Tabella 8.2 - Proprietà combustive della H₂

8.4 L'OSSIDAZIONE NELLE CELLE A COMBUSTIBILE

In alternativa alla combustione diretta, per produrre energia l'idrogeno può essere impiegato all'interno di celle a combustibile.

Le celle a combustibile sono sistemi elettrochimici capaci di convertire l'energia chimica di un combustibile (in genere idrogeno) direttamente in energia elettrica, senza l'intervento intermedio di un ciclo termico, ottenendo pertanto rendimenti di conversione più elevati rispetto a quelli delle macchine termiche convenzionali.

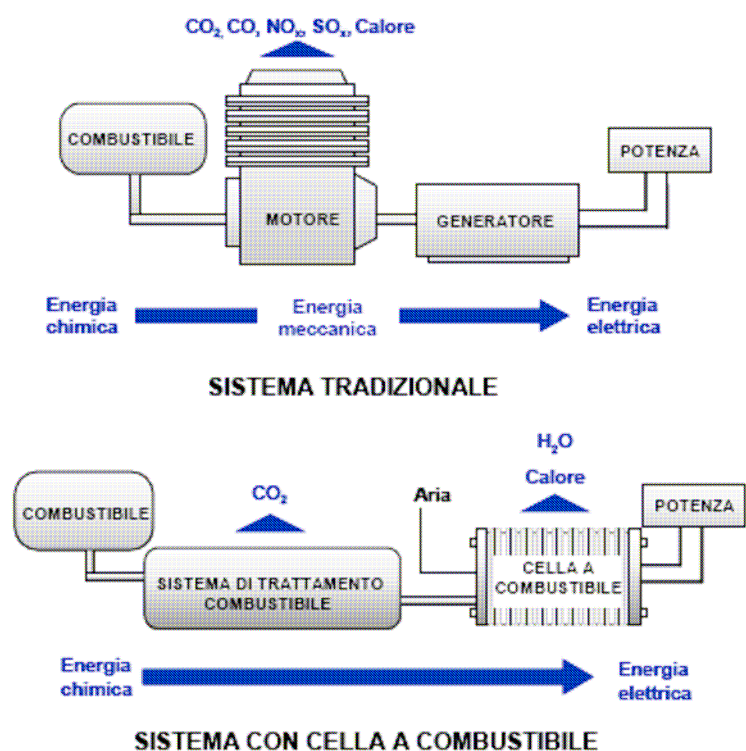


Figura 8.2

Una cella a combustibile funziona in modo analogo ad una batteria, in quanto produce energia elettrica attraverso un processo elettrochimico; tuttavia, a differenza di quest'ultima, consuma sostanze provenienti dall'esterno ed è quindi in grado di funzionare senza interruzioni, finché al sistema viene fornito combustibile (idrogeno) ed ossidante (ossigeno o aria).

La cella è composta da due elettrodi in materiale poroso, separati da un elettrolita. Gli elettrodi fungono da siti catalitici per le reazioni di cella che consumano fondamentalmente idrogeno ed ossigeno, con produzione di acqua e passaggio di corrente elettrica nel circuito esterno. L'elettrolita ha la funzione di condurre gli ioni prodotti da una reazione e consumati dall'altra, chiudendo il circuito elettrico all'interno della cella. La trasformazione elettrochimica è accompagnata da produzione di calore, che è necessario estrarre per mantenere costante la temperatura di funzionamento della cella.

Una singola cella produce normalmente una tensione di circa 0,7 V e correnti comprese tra 300 e 800 mA/cm², quindi per ottenere la potenza ed il voltaggio desiderato più celle sono disposte in serie, a mezzo di piatti bipolari, a formare il cosiddetto “*stack*”. Gli stack a loro volta sono assemblati in moduli, per ottenere generatori della potenza richiesta.

Le celle a combustibile rivestono un notevole interesse ai fini della produzione di energia elettrica, in quanto presentano caratteristiche energetiche ed ambientali tali da renderne potenzialmente vantaggiosa l'adozione.

Sono caratterizzate da:

- rendimento elettrico elevato, con valori che vanno dal 40-48% (riferito al potere calorico inferiore del combustibile) per gli impianti con celle a bassa temperatura, fino a raggiungere oltre il 60% per quelli con celle ad alta temperatura utilizzate in cicli combinati;
- possibilità di utilizzo di un'ampia gamma di combustibili come metano, metanolo, gas naturale, gas di sintesi (prodotto da combustibili liquidi, gassificazione del carbone, biomasse);
- modularità, che permette di accrescere la potenza installata via via che cresce la domanda di energia elettrica, con notevoli risparmi sul piano economico e con tempi di costruzione che possono risultare notevolmente ridotti;
- flessibilità di impiego poiché l'efficienza è sostanzialmente indipendente dal carico istantaneo e dalla taglia dell'impianto;
- ridottissimo impatto ambientale, sia dal punto di vista delle emissioni gassose che di quelle acustiche, il che consente di collocare gli impianti anche in aree residenziali, rendendo il sistema particolarmente adatto alla produzione di energia elettrica distribuita;
- possibilità di cogenerazione, particolarmente nel caso di celle che operano ad alta temperatura.

Normalmente le celle vengono classificate sulla base dell'elettrolita utilizzato. L'elettrolita determina o condiziona fortemente:

- il campo di temperatura operativo;
- il tipo di ioni e la direzione in cui diffondono attraverso la cella;
- la natura dei materiali costruttivi;
- la composizione dei gas reagenti;
- le modalità di smaltimento dei prodotti di reazione;
- le caratteristiche di resistenza meccanica e di utilizzo;
- la vita della cella.

Le celle a combustibile sono convenzionalmente classificate in base al tipo di elettrolita.

Distinguiamo celle:

- polimeriche o PFCF (Polymer Electrolytic Fuel Cell);
- alcaline o AFC (Alkaline Fuel Cell);
- ad acido fosforico o PEFC (Phosphoric Acid Fuel Cell);
- a carbonati fusi o MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell),
- ad ossidi solidi (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)
- a metanolo diretto (Direct Methanol Fuel Cell, DMFC).

Il campo d'impiego di un tipo di FC è determinato dalle sue caratteristiche di funzionamento ed in particolare dalla temperatura di lavoro e dal tipo di combustibile utilizzato. In tabella 8.3 sono riportate in forma schematica le caratteristiche tecniche delle principali celle a combustibile.

TIPI DI FC	ELETTROLITA (IONI SCAMBIATI)	TEMP. (°C)	CATALIZZATORI	COMBUSTIBILE	OSSIDANTE	EFFICIENZA ELETTRICA (%)	STATUS
PEFC	Membrana polimerica (H ⁺)	70-100	Pt	H ₂ , Gas riformati	O ₂ , aria	40-60	Sistemi 5-250kW
AFC	KOH (OH ⁻)	60-120	Pt/Pd, Ni	H ₂ puro	O ₂ , aria	60	Sistemi 5-80kW
PAFC	Acido Fosforico (H ⁺)	160-200	Pt	H ₂ , Gas riformati	O ₂ , aria	40-50	Impianti dimostrativi fino 11 MW
MCFC	Carbonati Li e K (CO ₃ ⁻)	600-700	Ni	H ₂ , Gas riformati	O ₂ , aria	45-55	Impianti dimostrativi fino 2 MW
SOFC	Ossidi di zirconio (O ⁻)	800-1000	-	H ₂ , Gas riformati	O ₂ , aria	45-60	Sistemi 25 kW Impianto 100 kW
DMFC	Membrana polimerica (H ⁺)	90-130	Pt lega Pt-Ru	Metanolo	O ₂ , aria	40-60	Laboratorio

Tabella 8.3

8.5 L'IMPATTO AMBIENTALE

L'idrogeno è un combustibile intrinsecamente pulito. Infatti, essendo completamente privo di carbonio, può essere bruciato senza produrre CO, CO₂ e particolato; è facilmente infiammabile per cui sostanzialmente non produce incombusti ed in ogni caso, allorquando la combustione non fosse completa, in ambiente sarebbe rilasciato solo idrogeno elementare o molecolare, completamente atossico; inoltre, trattandosi di un combustibile prodotto per via industriale, possiamo ritenerlo sostanzialmente privo di impurezze e, dunque, sono praticamente nulle le

emissioni di composti solforati e/o diossine. Di fatto, l'unica possibile emissione inquinante derivante da impieghi diretti dell'idrogeno sono gli NO_x termici che si generano bruciando in aria.

Tutto quanto detto nell'ambito della combustione diretta vale anche nel caso di consumo in celle a combustibile. Addirittura qui, usando l'aria come comburente, è praticamente assente la produzione di NO_x termici che sono legati alla persistenza dell'azoto molecolare a temperature ben superiori ai 1.000 °C; si tratta, invero, di una condizione che nelle celle a combustibile non si raggiunge praticamente mai.

Naturalmente, sia nella combustione diretta che nell'impiego in celle a combustibile, la valutazione corretta dell'impatto ambientale dell'idrogeno non può prescindere dalle emissioni inquinanti del processo di produzione. Pertanto, solo se è stato prodotto mediante fonti rinnovabili, l'idrogeno può essere considerato un combustibile pulito.

8.6 LA PRODUZIONE DI IDROGENO

L'idrogeno non è una fonte primaria di energia, bensì un vettore energetico. Esso cioè non è disponibile liberamente in natura, se non in quantità molto ridotte; deve pertanto essere prodotto a partire da altri composti con un dispendio di energia

L'idrogeno può essere generato facilmente impiegando energia chimica o elettrica; in tutto il mondo, però, sono in corso studi al fine di individuare soluzioni ottimali per la produzione con energia termica.

Oggi nel mondo sono prodotti più di 500 Gm^3 di H_2 . Di questi il 96-97% circa deriva da combustibili fossili (impiegando energia chimica) ed il restante 3-4% dall'elettrolisi dell'acqua (impiegando energia elettrica). Da un punto di vista meramente energetico, però, processi di produzione più convenienti sono l'elettrolisi (se l'apporto energetico avviene attraverso corrente elettrica) e lo steam reforming del metano (se l'apporto energetico avviene attraverso combustibili).

8.6.1 Lo steam reforming del metano

La produzione di idrogeno mediante uso di combustibili fossili può avvenire secondo differenti modalità. Attualmente il processo dello “steam reforming” del gas naturale (Steam Methane Reforming – SMR) è sicuramente il più efficiente e ampiamente utilizzato, oltre che il più economico. Attraverso lo steam reforming si produce circa il 47% dell’idrogeno mondiale.

La reazione principale di steam reforming del metano è:



Trattandosi di reazione fortemente endotermica, essa è favorita alle alte temperature. D'altronde per una corretta analisi termodinamica è necessario considerare almeno altre due reazioni.



La (2) è ancora una reazione endotermica ovvero favorita alle alte temperature; diversamente, la (3) è debolmente esotermica ovvero è favorita a bassa temperatura. Nel complesso ad alta temperatura sono favorite sia la (1) che la (2); quest’ultima, però, è indesiderata perché non solo determina una minore produzione di idrogeno, ma anche perché genera residui carboniosi solidi. Non potendo intervenire sulle temperature, per privilegiare la (1) non rimane che utilizzare rapporti di alimentazione acqua/metano ben più elevati del valore stechiometrico.



Figura 8.3 - Reformer di medie dimensioni alimentato da gas naturale

Negli impianti di steam reforming solitamente esistono due reattori. Nel primo si opera a temperatura più bassa (circa 600 - 700° C) per consentire che il calore inizialmente possa essere trasferito mediante scambio termico superficiale. Nel secondo reattore, invece, si sale di temperatura (ben al di sopra dei 1.000°C); iniettando ossigeno in opportuna quantità, è possibile incrementare i livelli termici a spese di una combustione endogena che consuma parte dell'idrogeno generato nel primo reattore. Può sembrare strano che si bruci idrogeno per generare idrogeno, ma in questo modo è possibile spostare a destra l'equilibrio della (1): il beneficio della maggiore conversione di CH_4 è più che sufficiente per compensare il consumo di idrogeno; diversamente, ci sarebbero significative percentuali di CH_4 in uscita dal processo.

Successivamente, previa separazione della CO presente all'uscita dello steam reformer, è possibile aumentare la quantità di idrogeno prodotto favorendo la (3) ovvero operando a temperature considerevolmente più basse. La (3) è usualmente chiamata reazione di “*shift*”.

Nel processo tradizionale gli idrocarburi stessi rappresentano contemporaneamente il materiale di processo e la fonte energetica. In questa configurazione, il rendimento di conversione è

circa il 65%, mentre negli impianti che impiegano cascami termici di altra natura (per esempio cogenerativi) sono stati raggiunti rendimenti fino all'80%.

I costi dello SMR sono notevolmente inferiori a quelli dell'elettrolisi e competitivi con quelli delle altre tecnologie. Esso comporta inoltre un ridotto impatto ambientale. Il principale limite dello steam reforming è legato alla non rinnovabilità della materia prima, in quanto il metano, pur abbondante, è comunque un combustibile fossile potenzialmente destinato ad esaurirsi. Inoltre, c'è comunque una minima produzione di sostanze inquinanti, cosa che non avviene nel caso di elettrolisi con energia rinnovabile. In ultimo occorre anche considerare che il livello di purezza non è paragonabile a quello dell'elettrolisi: l'idrogeno prodotto mediante steam reforming contiene un certo tasso d'impurità che lo rende inadatto ad alcuni tipi di applicazioni.

8.6.2 L'elettrolisi dell'acqua

L'elettrolisi dell'acqua è un processo elettrolitico nel quale il passaggio di corrente elettrica causa la decomposizione dell'acqua in ossigeno ed idrogeno gassosi.

La cella elettrolitica è in genere composta da due elettrodi di un metallo inerte immersi in una soluzione elettrolitica e connessi ad una sorgente di corrente.

La corrente elettrica dissocia la molecola d'acqua negli ioni H^+ e OH^- . Sotto l'effetto del campo elettrico esterno, gli ioni H^+ tenderanno ad accumularsi presso l'elettrodo negativo, il catodo, gli ioni OH^- presso l'elettrodo positivo, l'anodo.

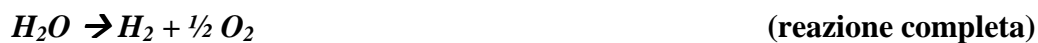
L'eccesso di cariche positive in prossimità del catodo è eliminato da una reazione di semireazione di riduzione.



Uguualmente l'eccesso di cariche negative in prossimità dell'anodo è eliminato da una semireazione di ossidazione.



In definitiva, sotto l'effetto del campo elettrico avviene la seguente reazione di ossido-riduzione:



L'energia elettrica necessaria per la dissociazione elettrolitica dipende dalle prestazioni dell'elettrolizzatore, ma in generale, per produrre 1 kg di H_2 occorrono circa 180 MJ ovvero 5 kWh.

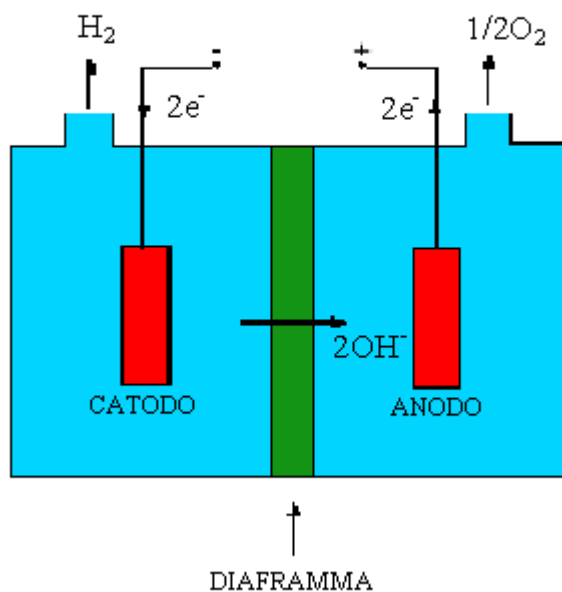
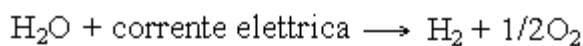


Figura 8.4 - Schema dell'elettrolisi dell'acqua

Nonostante sia la tecnologia più conosciuta, attualmente, solo il 4% dell'idrogeno prodotto a livello mondiale viene ottenuto grazie alla reazione di elettrolisi e solo per soddisfare richieste limitate di idrogeno estremamente puro. Il principale ostacolo che questa tecnologia incontra sono i costi, che a causa di un grande dispendio energetico, sono ancora troppo elevati. Inoltre, quanto più velocemente avviene la generazione dell'idrogeno, tanto maggiore è la potenza richiesta per chilogrammo prodotto. Così gli elettrolizzatori risultano molto più efficienti quando operano a bassa densità di corrente e, quindi, a bassi tassi di produzione. Attualmente si tende ad operare con voltaggi intorno a $1.85 \div 2.05$ V e densità di corrente di 2000 A/m^2 , con rendimenti intorno al $72 \div 80\%$. Per aumentare il rendimento e diminuire i costi, si prevede l'applicazione dell'elettrolisi con vapore ad alta temperatura ($900\text{-}1000^\circ\text{C}$). Infatti, l'alta temperatura del sistema accelera le reazioni, riduce le perdite d'energia dovute alla polarizzazione degli elettrodi ed accresce l'efficienza complessiva.

8.6.3 La produzione per via termica

La dissociazione spontanea dell'acqua o termolisi è una reazione fortemente endotermica. Ad elevata temperatura, avviene in maniera spontanea, benché solo oltre i 1.700°C sono evidenti percentuali apprezzabili di dissociazione; addirittura per la completa dissociazione della molecola di acqua in idrogeno e ossigeno, a pressione atmosferica, sono richieste temperature superiori ai 3200°C .

Gli elevati livelli termici richiesti dalla termolisi possono essere raggiunti grazie all'energia solare: infatti, mediante specchi convergenti, è possibile portare ad elevata temperatura l'acqua presente nel reattore termico verso cui è riflessa, in forma concentrata, l'energia radiante

I problemi principali con gli impianti di termolisi sono i bassi tassi di efficienza di conversione, le grosse perdite di calore e la difficoltà di procedere alla separazione ad alta temperatura dell'idrogeno prodotto.

Diversamente, al fine di abbassare le temperature operative, è possibile procedere per via termochimica. In ENEA l'argomento è ritenuto di grande interesse ed è oggetto di studio.

Il programma ENEA di ricerca e sviluppo dei processi per la produzione di idrogeno con sistemi solari a concentrazione è orientato sui seguenti obiettivi:

- elevata efficienza nella conversione da energia solare a idrogeno;
- ciclo chimico che possa essere realizzato in impianti relativamente semplici e con processi affidabili;
- uso di sostanze chimiche a basso impatto ambientale, disponibili in abbondanza e a basso costo.

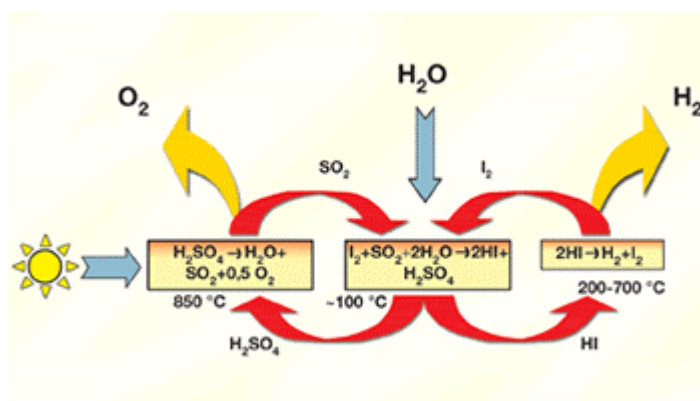


Figura 8.5 - Schema della separazione di idrogeno mediante ciclo zolfo-iodio

Tra i processi che sono ad uno stadio di ricerca più avanzato nei laboratori ENEA va evidenziato il processo zolfo-iodio. Inizialmente il processo zolfo-iodio fu proposto per essere alimentato dal calore prodotto da un reattore nucleare a gas; in seguito è stata sviluppata una versione solare.

Esso è basato sulle seguenti reazioni:





Il ciclo zolfo-iodio si basa su tre reazioni fondamentali:

- la produzione degli acidi solforico e iodidrico (reazione esotermica a bassa temperatura);
- la dissociazione dell'acido solforico con produzione di vapore acqueo, ossigeno ed anidride solforosa, quest'ultima riciclata alla fase di produzione degli acidi;
- la dissociazione catalitica dell'acido iodidrico con produzione di idrogeno e iodio, che viene riciclato alla reazione di produzione degli acidi (reazione debolmente endotermica con temperature variabili in funzione dei catalizzatori e delle condizioni operative).

La concentrazione dell'acido solforico e le successive operazioni fino ad arrivare ai prodotti della sua dissociazione, rappresentano le fasi in cui è richiesta la maggior parte del calore di processo ad alta temperatura.

Sono stati già realizzati nel mondo alcuni impianti sperimentali che hanno dimostrato la fattibilità della produzione continua di idrogeno.

8.7 L'ACCUMULO DELL'IDROGENO

Gli odierni impieghi dell'idrogeno prevedono che esso venga utilizzato nei pressi del luogo di produzione e in tempi rapidi, per cui l'efficienza dei sistemi di accumulo è attualmente di scarso interesse. Al contrario, il problema dell'accumulo è particolarmente critico quando si utilizza l'idrogeno come vettore energetico: quando produzione e consumo sono separati nel tempo, infatti, occorre giocoforza prevedere un idoneo sistema di accumulo.

I problemi tecnici connessi con l'accumulo dell'idrogeno derivano dalle sue caratteristiche chimico fisiche: esso è il combustibile con la massima densità energetica riferita alla massa, ma è anche quello con la minima densità energetica riferita al volume, sia allo stato gassoso che liquido.

Al di là di tecniche ancora in fase di sperimentazione e studio, esistono sostanzialmente tre tecnologie ampiamente consolidate. L'idrogeno, infatti, può essere accumulato:

- in forma gassosa all'interno di serbatoi in pressione;
- in forma liquida;
- mediante idruri metallici.

Prima di entrare nello specifico delle singole tecniche sono opportune due precisazioni.

Quando occorre scegliere come accumulare l'idrogeno, il principale vincolo è spesso costituito dagli spazi a disposizione. La valutazione degli ingombri, dunque, è quasi sempre il primo parametro da considerare per la scelta del sistema più idoneo. I volumi esterni, però, non dipendono solo dalla quantità di idrogeno stoccata, ma, spesso, sono pesantemente condizionati dalle strutture di contenimento: dunque, quando occorre confrontare più sistemi in termini di densità energetica occorre anche considerare gli ingombri dei serbatoi.

Combustibile	Densità di energia [kWh/kg]	Densità di energia [kWh/litro]
Benzina	33,3	8,6
Metano liquefatto	13,9	5,8
Idrogeno liquefatto	33,3	< 3

Tabella 8.4 - Densità energetica di benzina, metano liquefatto ed idrogeno liquefatto

L'idrogeno è il combustibile con la massima densità energetica riferita alla massa, ma è anche quello con la minima densità energetica riferita al volume, sia allo stato gassoso che liquido.

In tabella 8.4, per esempio, sono riportate le densità di energia in massa ed in volume di benzina, metano liquefatto ed idrogeno liquefatto.

8.7.1 L'accumulo in forma gassosa

E' il metodo più semplice e più utilizzato. Consiste nella compressione in bombola, a temperatura ambiente ed a pressione di 200 bar (20 Mpa) ed oltre.

Sulla base dei serbatoi attualmente disponibili in commercio e facendo riferimento all'intero sistema combustibile/serbatoio, la densità minima è pari a 0,5 kWh/kg ed è relativa a recipienti in pressione in acciaio capaci di operare a 200 bar (20 MPa), mentre la massima raggiunge i 2,15 kWh/kg e si riferisce a serbatoi in materiale composito che possono resistere fino a 250 bar (25 MPa). Si noti che la densità energetica in massa dell'idrogeno è pari a 33,3 kWh/kg. Procedendo all'accumulo in forma gassosa, la densità energetica per unità di massa dell'intero sistema di accumulo scende di almeno un ordine di grandezza. E' evidente quale sia l'influenza in peso del sistema di accumulo.

Si può ulteriormente incrementare la densità energetica dell'idrogeno gassoso, salendo ancora di pressione, ma in questo caso sono richiesti serbatoi in materiale composito rinforzati con fibre di carbonio. Gli sviluppi più recenti hanno permesso di raggiungere pressioni fino a 700 bar (700 MPa): in questo caso si arriva ad una densità di energia di circa 1,3 kWh/litro ovvero circa la metà della densità dell'idrogeno liquido.

8.7.2 L'accumulo in forma gassosa

Per incrementare la densità di energia, l'idrogeno è liquefatto a $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, ma anche in queste condizioni la densità di energia è circa un 1/3 di quella della benzina. Oltre a questa limitazione, occorre anche considerare gli ulteriori svantaggi di una progressiva perdita di idrogeno liquido per

evaporazione (1-2% al giorno) e del dispendio energetico necessario per il mantenimento di condizioni criogeniche (si tratta di circa il 30% dell'energia contenuta nell'idrogeno liquefatto).

8.7.3 L'accumulo mediante idruri metallici

Gli idruri metallici sono leghe di magnesio, alluminio, ferro o lantanio, che contengono all'interno della struttura cristallina composti di nichel, vanadio, titanio, cromo, terre rare, tutti in grado di assorbire idrogeno nello spazio interatomico.

Il processo di carica-scarica è reversibile e si ottiene attraverso processi di assorbimento esotermico e desorbimento endotermico. Inoltre, usando leghe con differenti composizioni, è possibile ottenere sistemi in grado di rilasciare l'idrogeno a differenti pressioni. Ponendo l'idruro metallico in polvere all'interno di contenitori, dunque, è possibile accumulare idrogeno allo stato "solido".

Gli idruri sono suddivisi in funzione della temperatura di assorbimento/desorbimento: quelli a bassa temperatura operano tra i 20 ed i 90°C, quelli ad alta temperatura possono spingersi fino a 300°C. Gli idruri ad alta temperatura sono quelli con la maggior capacità di accumulo; la pressione di assorbimento è compresa tra 33 e 55 bar (3,3 e 5,5 MPa), mentre quella di rilascio varia 0,7 e 10 bar (0,07 e 1 MPa).

Con gli idruri metallici è possibile raggiungere densità di energia comprese tra 2,7 e 3,4 kWh/litro ovvero anche migliori dell'accumulo in forma liquida. Un ulteriore vantaggio è costituito dall'elevato livello di sicurezza che il sistema permette di raggiungere, essendo il rischio di perdite di idrogeno, anche a seguito di collisioni, quasi nullo.

Pur tuttavia, gli alti costi di gestione, il peso elevato, la limitata capacità di immagazzinamento in termini massici, la progressiva riduzione della capacità di accumulo nel tempo, ne limitano fortemente la convenienza.

8.8 L'INTEGRAZIONE DELL'IDROGENO NEI SISTEMI ENERGETICI

In generale, l'integrazione dell'idrogeno nei sistemi energetici è interessante per:

- servire le utenze isolate
- recuperare energia altrimenti dispersa;
- ragioni di carattere ambientale.

La prima finalità ha già valenze applicative perché consente di risolvere il problema dell'autonomia energetica delle utenze isolate.

La seconda finalità è tecnicamente possibile laddove sia rivolta all'ottimizzazione dei sistemi di generazione distribuita, ma è spesso poco competitiva dal punto di vista economico.

L'ultima finalità, infine, deve essere inquadrata in un'ottica di medio/lungo periodo perché necessita di massicci investimenti infrastrutturali ed è, per lo meno, subordinata alla creazione di un'idonea rete territoriale di distribuzione dell'idrogeno.

8.8.1 L'idrogeno al servizio delle utenze isolate

Nei luoghi non serviti da reti di distribuzione territoriale l'idrogeno consente di raggiungere l'autonomia energetica con un'affidabilità senza pari. Pensiamo, per esempio, ad una baita di montagna non servita dalla rete elettrica ed impossibilitata ad essere raggiunta da autocisterne per il trasporto di GPL; in questa ipotesi non è possibile ricorrere ad un gruppo elettrogeno. Ovviamente, tutto l'input energetico non può che provenire da fonte rinnovabile. Nel caso in questione, ipotizziamo che la baita abbia integrato nel tetto un impianto fotovoltaico.

Con la configurazione di impianto riportata in figura 8.6, il problema dell'autonomia energetica è completamente superabile a patto che il serbatoio sia opportunamente dimensionato e che le utenze termiche possono impiegare idrogeno.

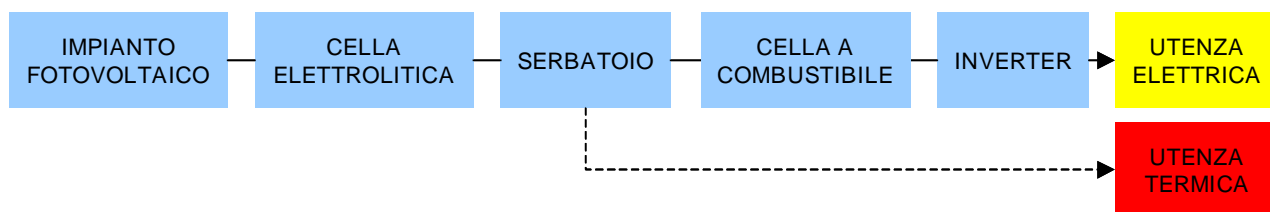


Figura 8.6 - Possibile configurazione di impianto di un'utenza isolata

Nell'impianto sopra descritto (che peraltro può essere ulteriormente integrato con pannelli solari termici) il ruolo dell'idrogeno è fondamentale in quanto funge da sistema di accumulo a medio termine, ovvero consente di poter superare anche fasi di perdurante assenza del Sole. In nessun altro modo sarebbe possibile l'accumulo, si badi bene, a tempo indeterminato: infatti, l'accumulo elettrico mediante batterie è limitato nel tempo e, comunque, comportando la necessità di procedere alla periodica sostituzione degli accumulatori elettrici, offre minori garanzie in termini di affidabilità.

8.8.2 Le finalità di recupero energetico

L'idrogeno non è una fonte energetica e la sua integrazione nella generazione di potenza in linea di massima non determina benefici di tipo energetico. Nel momento in cui l'idrogeno dovesse consentire di immagazzinare energia altrimenti dispersa, si determinerebbe un evidente recupero energetico ed, in questo caso, l'idrogeno potrebbe essere considerato anche una fonte energetica.

Invero, si tratta di uno scenario piuttosto remoto che, però, potrebbe divenire realistico nel momento in cui la ricerca tecnica e scientifica dovesse rendere disponibile una valida tecnologia per produrre idrogeno per via termica a temperatura non troppo alta. In questo caso, infatti, l'idrogeno potrebbe essere prodotto attraverso il solare a concentrazione, divenendo a tutti gli effetti una fonte energetica flessibile e pulita.

Inoltre, sarebbe finalmente possibile l'accumulo di energia termica ovvero per la cogenerazione si aprirebbero nuovi scenari. Particolarmente favorita potrebbe essere la micro-cogenerazione, che usualmente non consente di avere rendimenti di generazione elettrica elevati e genera cascami termici percentualmente più rilevanti.

8.8.3 I vantaggi ambientali dell'idrogeno

L'integrazione dell'idrogeno nei sistemi energetici di città e zone ad elevata densità abitativa è sicuramente auspicabile per ragioni ambientali. L'idrogeno non è necessariamente un vettore energetico pulito perché il suo impatto ambientale dipende dalla fonte energetica impiegata per la produzione. In ogni caso, però, l'idrogeno consente di delocalizzare l'inquinamento. Infatti, eventuali emissioni inquinanti sono generate all'atto della produzione e non del consumo (a meno di eventuali NOx termici); diversamente, ogni altro combustibile genera il grosso dell'inquinamento all'atto dell'impiego. Così laddove esiste una domanda di energia fortemente concentrata nello spazio, come nelle città, impiegando combustibili tradizionali è necessario dover convivere con forti concentrazioni di agenti inquinanti; diversamente, con l'idrogeno è possibile consumare energia, anche in forma massiccia, con un impatto ambientale su scala locale addirittura risibile.

D'altronde, la produzione centralizzata di idrogeno teoricamente consente di generare energia con minore impatto ambientale perché operando su larga scala è possibile adottare accorgimenti non proponibili procedendo nell'ambito di una produzione distribuita.

Per meglio capire quanto detto, si pensi al problema del particolato solido che rappresenta una grave minaccia per la salute in molte città. La formazione del particolato è, comunque, riconducibile all'impiego di idrocarburi carboniosi: il particolato non è generato solamente dai veicoli a motore, ma è prodotto da caldaie, scaldini, fornelli, centrali termiche e quanto altro immette in atmosfera residui da combustione. Orbene, nelle città a causa di consumi intensivi, le concentrazioni di particolato superano di sovente i limiti di legge e ben poco è possibile fare senza

la collaborazione della cittadinanza ovvero senza limitare i consumi. L'idrogeno è una soluzione al problema. In primo luogo, consentendo di delocalizzare la produzione dell'energia da consumare in città in grandi impianti industriali situati al di fuori dei grossi agglomerati urbani, è possibile di fatto trasportare al di fuori delle atmosfere cittadine la produzione inquinante ovvero favorire la dispersione delle emissioni in ambienti aperti. In secondo luogo, negli impianti di grossa taglia è possibile controllare meglio la combustione (ovvero intervenire direttamente sul meccanismo di formazione del particolato), nonché ricorrere a sistemi e tecniche di filtrazione generalmente più efficienti di quelle adottabili nel caso di generazione distribuita.

Perché allora gli autoveicoli e le caldaie non funzionano ad idrogeno? Al di là di considerazioni di carattere economico che potrebbero rientrare grazie ad economie di scala, l'integrazione dell'idrogeno nei sistemi energetici non avviene a causa della mancanza della materia prima. Infatti, manca sul territorio una rete distributiva per approvvigionare le utenze domestiche; così come non esistono stazioni di rifornimento che possano rifornire i veicoli a motore alla pari di benzina e gasolio. Attualmente c'è una situazione di stallo: costruttori e produttori attendono che siano costruite le reti così da poter immettere sul mercato i propri prodotti; d'altronde, nessuno costruisce le reti perché non c'è una domanda di idrogeno da soddisfare.

La realtà è che la presunta economia all'idrogeno tanto invocata è per ora un'utopia. Ed in assenza di interventi di carattere pubblico (anche solo in termini direttivi) tale rimarrà per lungo tempo. Solo una novità dirompente potrebbe cambiare le cose: potrebbe essere una nuova tecnologia in grado di generare idrogeno per via termica in maniera competitiva; oppure un sistema di accumulo in grado di stoccare l'idrogeno con densità paragonabili a quella della benzina.

In ogni caso, l'idrogeno sarebbe uno strumento formidabile per sviluppare piani di mobilità sostenibile: infatti, se i veicoli a motore oggi consumassero idrogeno ci sarebbero vantaggi ambientali senza sostanziali penalizzazioni di carattere energetico.

In generale, i motori a combustione interna hanno rendimenti del 25÷35% se alimentati a benzina, del 30÷40% se alimentati a gasolio. Adottando celle a combustibile con rendimento pari al

40÷60% ed ipotizzando che l'idrogeno provenga da un processo di steam reforming (ovvero con rendimento del 65%), si ottiene che il rendimento complessivo del sistema integrato produzione/consumo oscillerebbe tra il 26% ed il 39%. In termini di energia primaria consumata, non cambierebbe molto, ma in termini ambientali le cose sarebbero completamente diverse e l'aria nelle nostre città migliorerebbe non poco. Diversamente, impiegando l'idrogeno direttamente in un motore ad accensione comandata (scelta caldeggiata dalla BMW) l'impiego dell'energia primaria sarebbe sicuramente meno efficiente a causa dell'incidenza dei costi energetici di produzione dell'idrogeno.

D'altronde, per un impiego di massa dell'idrogeno in campo automobilistico, secondo il parere dello scrivente, l'unica opzione valida sembra essere l'accumulo in forma gassosa: stoccare l'idrogeno in forma liquida avrebbe, infatti, costi energetici estremamente elevati. In primo luogo, in un comune autoveicolo è piuttosto complicato pensare di recuperare l'energia spesa per il raffreddamento criogenico. In secondo luogo, occorre considerare che nell'utilizzo comune il veicolo stradale possa rimanere fermo per settimane, finanche mesi: in questo caso, dunque, l'idrogeno liquido pian piano vaporizzerebbe determinando nel serbatoio un incremento di pressione cui si può far fronte unicamente installando valvole di sicurezza per il rilascio in atmosfera. In termini di sicurezza, ciò non sembra un problema troppo grave (l'idrogeno salirebbe in atmosfera dove si legherebbe in composti più stabili), ma in termini energetici si genererebbero perdite; in virtù di ciò, l'impiego dell'idrogeno in forma liquida dovrebbe essere limitato ai soli veicoli soggetti ad un utilizzo continuativo, per esempio, negli autobus pubblici.

Sempre in un'ottica di impiego di massa, considerazioni analoghe portano a concludere che anche in ambito residenziale alle utenze l'idrogeno debba pervenire in forma gassosa. In questo caso, però, in linea teorica sarebbe possibile creare un'infrastruttura di rete mista: la spina dorsale della rete potrebbe contenere idrogeno liquido; ai capi della rete, invece, potrebbero esserci da un lato depositi per l'accumulo in forma gassosa (che fungerebbero da camera di compensazione dell'accumulo tra i siti di produzione e la parte criogenica di rete), dall'altro i terminali di

distribuzione agli utenti finali per la consegna di idrogeno in forma gassosa. Questa idea, naturalmente molto futuribile, consentirebbe anche di ristrutturare le rete elettrica di trasmissione per rispondere all'esigenza di trasporti di potenza elettrica crescenti: infatti, in parallelo alla rete criogenica di trasmissione dell'idrogeno, potrebbe tranquillamente essere realizzata una rete elettrica a semiconduttori per consentire di trasferire enormi quantità di corrente con costi energetici praticamente nulli. Negli Stati Uniti, un gruppo di fisici ed ingegneri sta lavorando ad un nuovo sistema di distribuzione dell'energia chiamato Continental SuperGrid. Secondo questo progetto, una nuova rete si svilupperà gradualmente al fianco di quella già esistente, migliorandone la capacità. Nei prossimi decenni, la nuova rete consentirà di distribuire non solo elettricità, in forma affidabile e a più basso costo energetico, ma anche idrogeno per i consumi privati, particolarmente nel settore dei trasporti.

9. CONCLUSIONI

Nel primo capitolo abbiamo individuato essenzialmente tre criticità:

- in un periodo di tempo più o meno limitato si esauriranno le riserve fossili da cui attingiamo oltre l'80% del fabbisogno energetico mondiale;
- con la continua immissione in atmosfera di gas climalteranti abbiamo verosimilmente innescato un pericoloso surriscaldamento dell'atmosfera;
- consumiamo ogni anno più risorse di quanto la terra possa generare.

Si tratta di gravi minacce che non possono essere sottovalutate perché le conseguenze per la specie umana potrebbero essere molto pesanti o addirittura catastrofiche. Le priorità di politica energetica dunque, devono essere volte ad individuare potenziali soluzioni dei problemi suddetti.

9.1 *LA POLITICA ENERGETICA DI BREVE PERIODO*

Da subito occorre attivarsi per ridurre i consumi da fonte fossile. L'obiettivo è teoricamente perseguibile accettando qualche rinuncia, ma l'umanità non sembra disposta a procedere lungo questa strada ed, addirittura, la tendenza è chiaramente in senso opposto. I Paesi industrializzati assolutamente non mostrano di voler rinunciare ad uno stile di vita fin troppo comodo ed agiato; dal canto loro, i Paesi in via di sviluppo ed ancor più quelli in transizione economica rivendicano inesorabilmente il diritto ad una migliore qualità di vita. Poiché non sembra possibile ridurre la domanda energetica globale, volendo ridurre i consumi fossili occorre necessariamente attingere da altre fonti energetiche. Concretamente, da subito occorre:

- 1) ridurre gli sprechi;
- 2) razionalizzare i sistemi energetici

- 3) incentivare le fonti rinnovabili

9.1.1 La riduzione degli sprechi

Sprecare meno energia significa ridurre i consumi senza che questo intacchi il livello di qualità della vita. Gli sprechi che bisogna contrastare sono quelli che provengono da atteggiamenti schiocchi e, sostanzialmente inutili, che non suscitano in chi li genera alcun incremento oggettivo del livello di qualità di vita. Sostanzialmente si tratta di non fare ciò che si può evitare.

La riduzione degli sprechi in concreto deve essere volta a:

- contenere le dispersioni termiche verso l'esterno da tutti i tipi di edifici (civili, industriali, militari);
- favorire il trasporto pubblico;
- penalizzare il trasporto privato se realizzato su mezzi di potenza esuberante le reali necessità individuali e familiari.

Sostenere la riqualificazione energetica degli edifici, disincentivare l'impiego di energia elettrica per la generazione di energia termica ed, al contrario, promuovere il trasporto di calore in luogo della generazione, favorire la diffusione di elettrodomestici di classe superiore, incentivare il trasporto pubblico, penalizzare la costruzione di automobili di potenza esuberante le reali necessità delle famiglie sono tutti interventi che potrebbero consentire risparmi energetici consistenti senza quasi intaccare la qualità della vita.

La UE si è posta l'obiettivo di migliorare almeno del 20% l'efficienza energetica di qui al 2020.

9.1.2 La razionalizzazione dei sistemi energetici

Come nel caso precedente, la razionalizzazione dei sistemi energetici consente di risparmiare energia. Diversamente dal caso precedente finalizzato a non fare ciò che si può evitare, nella razionalizzazione dei sistemi energetici è necessario attivarsi per realizzare meglio ciò che si deve fare. Mentre nel caso precedente l'obiettivo era perseguibile senza determinare particolari complicazioni logiche, la razionalizzazione dei sistema energetici è subordinata alla capacità di accettare una maggior grado di complessità: dunque, necessita di una pianificazione preventiva e mirata. In virtù di ciò la riduzione degli sprechi deve partire dal basso (richiedendo la compartecipazione di tutti), mentre la razionalizzazione dei sistemi energetici non può che partire dall'alto (presupponendo opportuni indirizzi direttivi).

L'energia risparmiata con interventi di recupero costituisce una riserva energetica assimilabile alle rinnovabili.

L'ottimizzazione energetica dei processi produttivi consente di recuperare cascami termici attraverso la riconversione dei processi produttivi. L'esempio più classico è costituito dalla cogenerazione e dalla termovalorizzazione dei rifiuti.

9.1.3 L'incentivazione delle fonti rinnovabili

L'incentivazione delle fonti rinnovabili si rende necessaria per tre motivi:

- consente di consumare energia senza immettere CO₂ in atmosfera;
- permette di ritardare l'esaurimento delle fonti fossili;
- genera un know-how preziosissimo per quando saranno terminate le riserve di fonti soggette ad esaurimento.

Dall'analisi dei capitoli precedenti, è emerso che la fonte da incentivare più di tutte è il solare. L'energia irradiata dal Sole è più o meno sfruttabile in ogni parte della terra ed è l'unica che teoricamente sarebbe capace di rendere disponibili energia in quantità tale da abbandonare le fonti fossili. Il principale ostacolo alla limitazione è la non competitività economica con le altre fonti. Ma è un limite che potrebbe essere abbattuto grazie alle economie di scala che potrebbero nascere nel momento in cui le applicazioni solari dovessero diffondersi in tutto il mondo.

In ogni caso, sarebbe opportuno che l'incentivazione delle fonti rinnovabili fosse subordinata allo sviluppo di sistemi di produzione capaci di fornire contributi sostanziali ai fabbisogni energetici di territori e/o comunità locali. Incentivare il geotermico, che è legato a particolari realtà locali, non può generare uno sviluppo tecnologico che possa contribuire in maniera sostanziale a risolvere i problemi energetici del mondo; tuttavia, distoglie risorse da destinare altrove (per esempio al solare) ritardando lo sviluppo di tecnologie ed economie di scala di cui potrebbe beneficiare l'umanità intera.

La UE punta ad incrementare la percentuale dell'energia ricavata da fonti rinnovabili fino al 20% entro il 2020.

9.2 LA POLITICA ENERGETICA NEL MEDIO-LUNGO PERIODO

Nel medio-lungo periodo sarebbe opportuno discriminare gli impieghi delle fonti energetiche al fine di migliorarne l'utilizzazione o minimizzare l'impatto ambientale. In questa ottica, converrebbe destinare:

- il metano alla produzione di idrogeno mediante steam reforming;
- il carbone alla generazione elettrica, prevedendo massicciamente il sequestro della CO₂ generata;
- i combustibili liquidi ad alta densità energetica alla propulsione aerea;

- il gasolio alla propulsione navale e stradale oltre i 30 kW di potenza;
- la benzina ai soli motori di potenza inferiore ai 30 kW.

Lo steam reforming del metano è il metodo più efficiente per generare idrogeno. Infatti, a parità di risultato, determina il minor consumo di energia primaria e la minore produzione di CO₂. Prevedendo di installare nelle immediate vicinanze delle città una o più unità di steam refoming, è possibile rifornire di idrogeno i centri densamente abitati attraverso reti locali appositamente realizzate.

Il carbone è il combustibile che genera più CO₂ per unità di energia generata. In futuro, per contenere le concentrazioni in atmosfera, potrebbe essere necessario sequestrare la CO₂ ed immetterla nel sottosuolo. E' verosimile ritenere che non sarà necessario sequestrare tutta la CO₂ prodotta ogni anno, ma soltanto quel tanto che basta per evitare un eccessivo surriscaldamento; in ogni caso, è ragionevole ritenere che il sequestro della CO₂ parta dal carbone. D'altronde, il carbone e l'energia elettrica sono trasportabili più facilmente della CO₂. Poiché il carbone e l'energia elettrica sono trasportabili più facilmente della CO₂, al fine di limitare i costi energetici del processo di sequestro, conviene che tutto il carbone sia destinato ad impianti elettrici di nuova costruzione localizzati nelle vicinanze del luogo in cui la CO₂ è immessa nel sito di stoccaggio.

Per la propulsione aerea è possibile solamente usare combustibili liquidi ad alta densità energetica; la necessità di ridurre gli ingombri e di contenere i pesi obbliga a non poter fare diversamente. In ogni caso, si tratta di mantenere lo status quo.

Il gasolio, sebbene, a parità di energia termica generata, emetta più CO₂, nei motori ad accensione per compressione consente di ottenere rendimenti più elevati di quanto non sia possibile ricavare con la benzina in motori ad accensione comandata. Così conviene che, quando sono necessarie elevate potenze, si ricorra a motori ad accensione per compressione (alimentati a gasolio); a bassa potenza, invece, si può tollerare l'impiego di motori ad accensione comandata (alimentati a benzina) che sono più semplici ed economici da costruire.

Parallelamente, occorre investire in ricerca nucleare.

In un'ottica di medio periodo, infatti, l'obiettivo dovrebbe essere volto ad approfondire gli aspetti relativi allo smaltimento del combustibile nucleare esausto. Gli impianti a fissione con reattori autofertilizzanti, infatti, da soli potrebbero soddisfare l'attuale fabbisogno energetico mondiale per almeno 3÷4 secoli. In questo modo, sarebbe possibile differire di parecchi secoli il problema dell'autonomia energetica ed il mondo potrebbe guardare al futuro senza temere il riscaldamento globale. Pur tuttavia rimane il problema delle scorie inquinanti che anzi si ingigantisce enormemente: infatti, quanto meglio si utilizza l'uranio minerale, tanto più aumenta la quantità di U^{238} che si trasforma in prodotti di fissione e transuranici. Occorre capire bene quali potrebbero essere le conseguenze sanitarie di uno stoccaggio di lungo periodo. Finché determinati aspetti non saranno chiariti, non conviene spingere sul nucleare che, però, al momento è l'unica alternativa alle fonti fossili che sia anche economicamente competitiva.

In un'ottica di lungo periodo, infine, occorre sostenere la ricerca volta alla realizzazione di reattori nucleari a fusione. Invero, l'obiettivo non è ancora a portata di mano, ma nel giro di qualche decennio potrebbe essere raggiunto. Fornendo una soluzione definitiva al problema energetico del mondo.

BIBLIOGRAFIA

[1]	<i>CHIMICA INDUSTRIALE</i> (di Vincenzo Tufano, Cooperativa Universitaria editrice Napoletana, 1984)
[2]	<i>ENERGIA – STORIA E SCENARI</i> (di Umberto Colombo, editore Donzelli, 1996)
[3]	<i>L'ENERGIA: QUALE FUTURO E QUALI SCENARI?</i> (di Carlo Rizzato, articolo tratto dal Quaderno delle Scienze “Risorse energetiche”, dall’edizione italiana di Scientific American)
[4]	<i>ENERGIA: UNA DOMANDA MAL POSTA</i> (di John P. Holdren, articolo tratto da “Le Scienze”, febbraio 2002)
[5]	<i>ENERGIA, OGGI E DOMANI</i> (di Nicola Armaroli e Vincenzo Balzani, Bionomia University Press, 2004)
[6]	<i>ENERGIA: LA PROMESSA CHE VIENE DAL SOLE</i> (di Guido Agostinelli, Maurizio Acciarri, articolo tratto da “Le Scienze”, maggio 2006)
[7]	<i>ECOCIDIO</i> (di J. Rifkin, 2002)
[8]	<i>ATTIVITA' UMANA E CAMBIAMENTI CLIMATICI</i> (di Robert j. Charlson e Tom M.L. Wigley, articolo tratto dal Quaderno delle Scienze “Risorse ambientali”, dall’edizione italiana di Scientific American)
[9]	<i>CRESCITA DEMOGRAFICA E PRODUZIONE ALIMENTARE</i> (di John Bongaarts, articolo tratto dal Quaderno delle Scienze “Risorse ambientali”, dall’edizione italiana di Scientific American)
[10]	<i>L'ECOLOGIA INDUSTRIALE</i> (di Robert A. Frosch, articolo tratto dal Quaderno delle Scienze “Risorse ambientali”, dall’edizione italiana di Scientific American)
[11]	<i>UNA SCOMODA VERITA'</i> (di Al Gore, Rizzoli, 2006)
[12]	<i>RISCALDAMENTO GLOBALE. IGNORARE LA COMPLESSITA'</i> (di Stephen Schneider, articolo tratto da “Le Scienze”, febbraio 2002)
[13]	<i>RISCALDAMENTO CLIMATICO: UNA BOMBA DA DISINNESCARE</i> (di James Hansen, articolo tratto da “Le Scienze”, aprile 2004)
[14]	<i>CATTURARE I GAS SERRA</i> (di Howar Herzog, Baldur Eliasson e Olav Kaarstad, articolo tratto dal Quaderno delle Scienze “Risorse energetiche”, dall’edizione italiana di Scientific American)
[15]	<i>STRATEGIE PER RIDURRE I GAS SERRA</i> (di Gianni Silvestrini, articolo tratto dal Quaderno delle Scienze “Risorse energetiche”, dall’edizione italiana di “Scientific American”)
[16]	<i>QUANDO INIZIAMMO AD ALTERARE IL CLIMA</i> (di William F. Ruddiman, articolo tratto da “Le Scienze”, maggio 2005)
[17]	<i>CLIMA E CAMBIAMENTI CLIMATICI</i> (opuscolo ENEA, 2002)
[18]	<i>STEAM AND GAS TABLES WITH COMPUTER EQUATIONS</i> (di Thomas F. Irvine jr, Peter E. Liley, editore Academic Press)
[2]	<i>APPUNTI CORSO DI “STRUTTURA DELLA MATERIA”</i> (dalle lezioni del Prof. Antonio Barone, corso di base della Scuola Dottorale in Ingegneria Industriale)

[2]	<i>FONDAMENTI DI ENERGETICA</i> (di Rita Mastrullo, Pietro Mazzei, Raffaele Vanoli, editore Liguori)
[7]	<i>LE ENERGIE RINNOVABILI</i> (di Andrea Bartolazzi, editore Hoepli, 2006)
[3]	<i>ECONOMIA ALL'IDROGENO</i> (di Jeremy Rifkin, Mondadori, 2003)
[6]	<i>LA RIVOLTA DI GAIA</i> (di James Lovelock, Rizzoli, 2006)
[8]	<i>LA SFIDA DEL SECOLO</i> (di Piero Angela e Lorenzo Pinna, Mondadori, 2006)
[9]	<i>L'ITALIA A SECCO</i> (di Mario Tozzi, Rizzoli, 2006)
[10]	<i>LA VERITA' NASCOSTA SUL PETROLIO</i> (di Eric Laurent, Nuovi Mondi Media, 2006)
[11]	<i>CHERNOBYL</i> (di Silvia Pochettino, Nuova Iniziativa Editoriale, 2006)
[13]	ENERGIA: QUALE FUTURO? (di Ugo Spezia, articolo tratto da "Le Scienze", giugno 2005)
[14]	<i>L'ENERGIA NUCLEARE DELLA PROSSIMA GENERAZIONE</i> (di James A. Lake, Ralph G. Bennet e John f. Kotek, articolo tratto da "Le Scienze", febbraio 2002)
[15]	<i>LA NUOVA GENERAZIONE DEI REATTORI NUCLEARI</i> (di William H. Hannum, Gerald E. Marsh, articolo tratto da "Le Scienze", aprile 2006)
[16]	<i>LA FUSIONE NUCLEARE E LA MACCHINA Z</i> (di Gerold Yonas, articolo tratto dal Quaderno delle Scienze "Risorse energetiche", dall'edizione italiana di Scientific American)
[17]	<i>LIBERARSI DELLE SCORIE</i> (di Cristina Valsecchi, articolo tratto da "Le Scienze", aprile 2006)
[18]	<i>IL NUCLEARE IN NATURA E IN TECNOLOGIA</i> (di Giorgio Salvini, articolo tratto dal Quaderno delle Scienze "Risorse energetiche", dicembre 2002)
[19]	<i>DA REATTORE A PRATO VERDE</i> (di Maurizio Cumo, articolo tratto da "Le Scienze", aprile 2003)
[20]	<i>C'ERA UNA VOLTA CAORSO</i> (di Marco Cattaneo, articolo tratto da "Le Scienze", aprile 2003)
[21]	<i>SMANTELLARE I REATTORI NUCLEARI</i> (di Matthew L. Wald, articolo tratto da "Le Scienze", aprile 2003)
[22]	<i>ENERGIA NUCLEARE DAL TORIO</i> (di Mujid Kazimi, articolo tratto da "Le Scienze", novembre 2003)
[23]	<i>NUCLEARE HEAVY METAL</i> (di Eric P.Lowen, articolo tratta da "Le Scienze", marzo 2005)

[24]	<i>CHERNOBYL, VENT'ANNI DOPO</i> (di Giovanni Spataro, articolo tratto da “Le Scienze”, aprile 2006)
[25]	<i>LE SCORIE RADIOATTIVE A YUCCA MOUNTAIN?</i> (di Chris G. Whipple, articolo tratto dal Quaderno delle Scienze “Risorse energetiche”, dall’edizione italiana di “Scientific American”)
[26]	<i>UNA NUOVA RETE PER L'ECONOMIA DELL'IDROGENO</i> (di Paul M. Grant, Chauncey Starr, articolo tratto da “Le Scienze”, settembre 2006)
[27]	<i>PRODUZIONE DI IDROGENO LIQUIDO DA CARBONE PULITO</i> (di Gianluca Valenti ed Ennio Macchi, memoria dal 61° Congresso nazionale ATI, settembre 2006)
[28]	<i>IDROGENO AL BIVIO: MOTORE O BATTERIE</i> (di Emilio Brambilla, articolo tratto da “Quattroruote”, gennaio 2007)
[29]	<i>UNA NUOVA RETE PER L'ECONOMIA DELL'IDROGENO</i> (di Paul M. Grant, Chauncey Starr, articolo tratto da “Le Scienze”, settembre 2006)
[30]	<i>LA LUNGA MARCIA DELL'AUTO A IDROGENO</i> (di Steven Ashley, articolo de “Le Scienze”, maggio 2005)
[31]	<i>UTENZA ISOLATA ALIMENTATA DA PANNELI FOTOVOLTAICI CON ACCUMULO AD IDROGENO</i> (di N. Arcuri e R. Bruno, memoria dal 61° Congresso nazionale ATI, settembre 2006)
[32]	<i>COLZA E SEI FRITTO</i> (articolo tratto da “Quattroruote”, agosto 2005)
[33]	<i>LE BIOCAPITALI D'ITALIA</i> (di Emilio Deleidi, articolo tratto da “Quattroruote”, marzo 2007)
[34]	<i>LA QUESTIONE VEGETALE</i> (intervista a Carlo Rubbia, articolo tratto da “Quattroruote”, settembre 2007)
[35]	<i>IL FUTURO DELL'AGRICOLTURA</i> (di Jerry D. Glover, Cindy M. Cox, John P. Reganold, articolo tratto da “Le Scienze”, ottobre 2007)
[36]	<i>NON SONO LE AUTO LA PRINCIPALE CAUSA DELLO SMOG NELLE CITTA'</i> (di Mariano Migliaccio, articolo tratto da “Mondo Auto”, maggio 2005)
[37]	<i>NON SONO LE AUTO CHE VANNO A CARBONE</i> (articolo tratto da Quattroruote, marzo 2005)
[38]	<i>L'AUTO CHE VERRA?</i> (articolo tratto da Quattroruote, febbraio 2004)
[39]	<i>370 km/h, MA VA A BATTERIA</i> (articolo tratto da Quattroruote, dicembre 2004)
[40]	<i>I VANTAGGI DEI VEICOLI ELETTRICI</i> (di Daniel Sperling, articolo tratto dal Quaderno delle Scienze “Risorse energetiche”, dall’edizione italiana di Scientific American)
[41]	<i>LA QUESTIONE ELETTRICA</i> (di Emilio Brambilla, articolo tratto da “Quattroruote”, settembre 2007)

[42]	<i>LA RISCOSSA DEL BENZINA</i> (di Emilio Brambilla, articolo tratto da “ <i>Quattroruote</i> ”, marzo 2007)
[43]	<i>CONDANNATE SENZA PROVE</i> (intervista ad Umberto Veronesi, articolo tratto da “ <i>Quattroruote</i> ”, febbraio 2007)
[44]	<i>AH, SE POTESSI DIMAGRIRE UN PO’</i> (di Emilio Brambilla, articolo tratto da “ <i>Quattroruote</i> ”, maggio 2007)
[45]	<i>CALORE AD ALTA TEMPERATURA DALL’ENERGIA SOLARE - UNA TECNOLOGIA INNOVATIVA PER UN’ENERGIA PULITA, DISPONIBILE CON CONTINUITÀ E AD UN COSTO COMPETITIVO</i> (opuscolo ENEA, 2004)
[46]	<i>COMBUSTIBILI CHIMICI DAL SOLE</i> (di Israel Dostrovsky, articolo tratto dal Quaderno delle Scienze “Risorse energetiche”, dicembre 2002)
[47]	<i>NORMATIVA SUL FOTOVOLTAICO E SULLE FONTI ENERGETICHE RINNOVABILI</i> D.Lgs 19 agosto 2005, n.192
[48]	<i>EMISSIONI ZERO</i> (allegato di “ <i>Quattroruote</i> ”, aprile 2007)
[49]	<i>ENERGIA: LA RESA DEI CONTI</i> (numero speciale de “ <i>Le Scienze</i> ”, novembre 2006)
[50]	<i>UN MEZZO PER IL CAMBIAMENTO</i> (di Lawrence D. Burns, J.B yron McCormick, Christopher E. Borroni-Bird, articolo tratto da “ <i>Le Scienze</i> ”, novembre 2002)
[51]	<i>ALTERO MATTEOLI: “LA MIA RICETTA PER SALVARE LE CITTA”</i> (di Sergio Cuti, articolo tratto da “ <i>L’Automobile</i> ”, maggio 2005) (articolo tratto da <i>Quattroruote</i> , febbraio 2004)
[52]	<i>ENERGIA: AMBIENTE E CLIMA</i> (speciale <i>Newton</i> , 2006)